

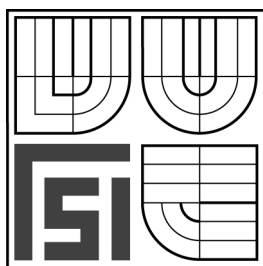
# Vysoké učení technické v Brně

## Fakulta strojního inženýrství

Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc.

### **Technický experiment**

Vybrané kapitoly



## Několik vět na úvod

Současnost lze označit za nastupující éru nadvlády počítačů. Vládnu dětem i mnoha dospělým v jejich volném čase, blikají na všech úrovních administrativy a byrokracie, není jediný učitel na střední a vysoké škole, který by si „nehrál“ s počítačem, žáci a posluchači bez počítačů jsou dnes výjimkou. Vžívá se představa, že s počítačem lze zvládnout jakýkoliv problém, že vše lze spočítat. Jaká je tedy skutečnost?

Ano, můžeme si vést přehledy o ziscích a ztrátách na úrovni rodin, států či kontinentů, rychle statisticky zpracovávat hromadné informace o hospodaření, popularitě, volbách, lidském genomu, či počasí. V pozadí těchto snadno realizovatelných činností však stojí matematická teorie statistiky. Bez ní, by statistické výpočty nebyly možné.

Počítače výrazně ovlivnily i možnosti a úroveň současných vědecko-technických výpočtů, tím, že umožnily řešit soustavy rovnic s velkým počtem neznámých. S využitím této skutečnosti vznikly různé numerické metody mechaniky kontinua, z nichž největšího rozšíření dosáhla metoda konečných prvků. S využitím této metody lze řešit s využitím výpočtového modelování složité problémy chování technických objektů např. z oblasti inženýrské mechaniky, technologických procesů, akustiky a magnetizmu, přírodních objektů v oblasti geologie a ekologie, ale i lidského organismu v rámci biomechaniky. Možnosti metody konečných prvků vyvolaly v západních zemích v sedmdesátých letech minulého století až nekritickou vlnu euforie, v rámci níž se hovořilo až o zániku experimentu. Ten se podle mnoha nadšenců měl stát zbytečným, když tito prohlašovali, že vše se dá spočítat.

Vlna euforie postupně upadala a experiment si znovu „vybojovával“ své nezastupitelné postavení v řešení mnoha technických i netechnických problémů. Naskytá se otázka, co způsobilo tento návrat do reality řešení problémů především v oblasti techniky?

V první řadě ta skutečnost, že výpočtové modelování je realizovatelné pouze tehdy, jsou-li splněny určité skutečnosti. Nutnou podmínkou k realizaci výpočtového modelování je existence takové matematické teorie, která věrohodně popisuje ten proces na objektu, který je předmětem řešení problému. Je to ale podmínka nedostačující. Navíc musí být splněno, že matematická teorie je „matematicky řešitelná“, jsou k dispozici výpočetní prostředky na její realizaci (to je v současnosti většinou splněno díky výkonným počítačům) a existují dostatečně věrohodné vstupní údaje do výpočtových algoritmů matematické teorie.

V přírodovědných, technických i biologických vědách existuje mnoho problémů, které nejsou řešitelné výpočtovým modelováním, protože není k dispozici potřebná matematická teorie, resp. další uvedené potřebné podmínky. Řešit za těchto podmínek problém je možno pouze experimentálně.

Mnoho jedinců, kteří při řešení problémů využívají výpočtové modelování si často neuvědomuje, že bez experimentu je výpočtové modelování nerealizovatelné, protože v době, kdy „počítají“ skutečně experiment nepotřebují. Ten je však potřebný před nebo po realizaci výpočtového modelování, a to v mnoha modifikacích. Experiment je potřebný k vytvoření systému podstatných veličin souvisejících s řešeným problémem. Má nezastupitelné místo při tvorbě, resp. při ověření správnosti příslušné matematické teorie. Vstupní údaje do výpočtových algoritmů se získávají téměř výhradně experimentálně. A nakonec, výsledky výpočtového modelování je nutné ověřit, což by mělo být provedeno především experimentálně.

Lze tedy konstatovat, že i v podmínkách současné výrazné orientace na výpočtové řešení problémů, je experiment, jak samostatným prostředkem k řešení problémů, tak i důležitou a nezastupitelnou mnohofunkční složkou výpočtového modelování.

Jestliže výpočtové modelování je dnes považováno za systémovou a tím i nadoborovou metodu řešení problémů, pak je žádoucí, aby i k experimentu bylo přistupováno systémově. Systémový přístup k experimentu je v předkládaných textech zohledněn především tím, že jsou zde vymezeny různé typy experimentů, uvedena zobecněná struktura experimentu, vymezen pojem teorie experimentu a uvedeny různé typy jeho chování.

Zobecněná struktura experimentu je se skládá z těchto čtyř základních prvků: procesní části experimentu, kterou realizuje experimentální tým, experimentální řetězec, teorie experimentu a programové vybavení experimentu. Teorie experimentu je zde vymezena jako

soustava složená z těchto dílčích teorií: teorie plánování měření, teorie řízení aktivace a měření, teorie aktivace experimentálního objektu, teorie měřicích metod a teorie statistického zpracování výsledků měření.

Jestliže nutnou podmínkou realizace výpočtového modelování je existence matematické teorie, pak nutnou podmínkou realizace experimentu je existence měřicí metody. A právě měřicím metodám pro oblast mechaniky tuhých těles je věnována podstatná část předkládaných textů. K nejdůležitějším metodám patří tenzometrie, které jsou věnovány samostatné texty. Z jiných důležitých metod je zde analyzován fotoelasticimetrie, křehké laky, interferenční metody, rentgenová tenzometrie a metody pro určování kinematických veličin, a to v rozsahu potřebném pro získání základních informací o těchto metodách.

Východiskem pro tyto texty bylo skriptum Technický experiment z roku 1988, skriptum Řešení problémů modelování z roku 1998 a připravovaná publikace Systémové pojetí nejen v technice.

Na závěr bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Miloši Vlkovi, CSc. za pečlivé přečtení celého textu a opravení drobných chyb. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lubomíru Houfkovi, PhD. a Ing. Petru Krejčímu, PhD. za elektronické zpracování textu.

Brno 31. března 2004

Za autorský kolektiv Přemysl Janíček

# Obsah

<b>1</b>	<b>KOMPLEXNÍ POJEDNÁNÍ O EXPERIMENTU .....</b>	<b>5</b>
1.1	VYMEZENÍ EXPERIMENTU .....	5
1.2	ZOBEZNĚNÁ STRUKTURA EXPERIMENTU.....	6
1.3	CHOVÁNÍ EXPERIMENTU .....	9
1.4	PŘÍPRAVNÁ ETAPA EXPERIMENTU.....	12
1.5	NÁVRHOVÁ ETAPA TECHNICKÉHO EXPERIMENTU .....	14
1.6	STRUKTURA KLASICKÉHO VÝPOČTOVÉHO MODELOVÁNÍ.....	16
1.7	ÚLOHA EXPERIMENTU VE VÝPOČTOVÉM MODELOVÁNÍ .....	16
<b>2</b>	<b>FOTOELASTICIMETRIE.....</b>	<b>18</b>
2.1	ROVINNÁ FOTOELASTICIMETRIE .....	18
2.1.1	<i>Postup při vyšetřování izoklin a izochromat .....</i>	<i>24</i>
2.2	PROSTOROVÁ FOTOELASTICIMETRIE.....	29
2.3	REFLEXNÍ FOTOELASTICIMETRIE .....	31
2.4	HODNOCENÍ FOTOELASTICIMETRICKÝCH METOD.....	33
<b>3</b>	<b>KŘEHKÉ LAKY .....</b>	<b>35</b>
3.1	VÝROBCI A DODAVATELE KŘEHKÝCH LAKŮ .....	35
3.2	MĚŘENÍ S KŘEHKÝMI LAKY .....	36
3.3	APLIKAČNÍ SFÉRY KŘEHKÝCH LAKŮ .....	37
<b>4</b>	<b>METODA FOLIE S PRASKAVOU VRSTVOU .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>METODA MOIRÉ .....</b>	<b>39</b>
5.1	VLASTNOSTI MOIRÉ PRUHŮ .....	39
5.2	VYHODNOCOVÁNÍ NAPĚTÍ Z MOIRÉ PRUHŮ .....	41
5.3	TYPY MŘÍŽEK, JEJICH PŘÍPRAVA A APLIKACE NA EO. ....	43
5.4	CITLIVOST A PŘESNOST MOIRÉ METODY .....	45
5.5	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ POMOCÍ PŘÍSTROJŮ .....	46
5.6	TYPY METODY MOIRÉ A JEJÍ SOUČASNÉ POSTAVENÍ V METODÁCH EAN .....	47
<b>6</b>	<b>HOLOGRAFICKÉ METODY.....</b>	<b>49</b>
6.1	ZÁKLADNÍ POJMY .....	49
6.2	HOLOGRAFICKÉ ZOBRAZENÍ PŘEDMĚTU .....	51
6.3	HOLOGRAFICKÁ INTERFEROMETRIE.....	52
6.4	ČLENĚNÍ METOD HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRIE.....	57
6.5	URČOVÁNÍ POSUVŮ Z HOLOGRAFICKÝCH INTERFEROGRAMŮ .....	59
6.5.1	<i>Určení posuvů z interferenčního řádu pruhu .....</i>	<i>59</i>
6.5.2	<i>Určení posuvů počítáním interferenčních pruhů při změně směru pozorování.....</i>	<i>60</i>
6.5.3	<i>Metoda filtrace v rovině holografického obrazu .....</i>	<i>61</i>
6.5.4	<i>Určení posuvu z lokalizace interferenčního obrazce.....</i>	<i>61</i>
6.6	ZHODNOCENÍ HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRIE.....	62
<b>7</b>	<b>LASEROVÉ SKVRNKY (LASER SPECKLE).....</b>	<b>63</b>
7.1	VZNIK KOHERENČNÍ ZRNITOSTI .....	63
7.2	MĚŘÍCÍ ROZSAH A PŘESNOST .....	67
<b>8</b>	<b>RENTGENOVÁ TENZOMETRIE .....</b>	<b>68</b>
8.1	ODVOZENÍ BRAGGOVY ROVNICE .....	69
8.2	ODVOZENÍ VZTAHŮ PRO URČENÍ NAPĚTÍ Z RENTGENOGRAFICKÝCH MĚŘENÍ.....	70
8.3	POSTUP PŘI URČOVÁNÍ NAPĚTÍ Z RENTGENOGRAFICKÝCH MĚŘENÍ.....	73
8.4	PRAKTICKÉ POKYNY PRO ZHOTOVENÍ RENTGENOGRAFŮ: .....	77
8.5	POZNÁMKA K MĚŘENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI .....	77
8.6	PROBLÉMY, PŘEDNOSTI A NEVÝHODY RENTGENOVÉ TENZOMETRIE .....	78
<b>9</b>	<b>METODA TERMÁLNÍ EMISE (SPATE METHOD).....</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>MĚŘÍCÍ METODY PRO SLEDOVÁNÍ PROCESU PORUŠOVÁNÍ TĚLES .....</b>	<b>81</b>
10.1	AKUSTICKÁ EMISE .....	81



10.1.1	<i>Fyzikální podstata vzniku akustické emise a příčiny jejího vzniku</i> .....	81
10.1.2	<i>Základní charakteristiky akustické emise</i> .....	83
10.1.3	<i>Měřicí a vyhodnocovací řetězec pro akustickou emisi</i> .....	84
10.1.4	<i>Aplikační sféry akustické emise</i> .....	85
10.2	INDIKACE VZNIKU A ŠÍŘENÍ TRHLINY VODIVÝM NÁTĚREM (CDC - CRACK DETECTION COATING) .....	93
10.3	INDIKACE ŠÍŘENÍ TRHLIN FOLIOVÝMI SNÍMAČI .....	94
10.4	ZÁKLADY FRAKTOGRAFIE .....	95
<b>11</b>	<b>MĚŘÍCÍ METODY PRO URČOVÁNÍ KINEMATICKÝCH VELIČIN</b> .....	<b>98</b>
11.1	ZÁKLADNÍ POJMY .....	98
11.2	APLIKAČNÍ OBLASTI URČOVÁNÍ KINEMATICKÝCH VELIČIN TĚLES .....	100
11.3	EXPERIMENTÁLNÍ ŘETĚZEC PŘÍSTROJŮ PRO MĚŘENÍ A ANALÝZU MECHANICKÉHO KMITÁNÍ .....	102
11.4	SNÍMAČE MECHANICKÉHO KMITÁNÍ .....	104
11.5	PRINCIP, TEORIE A VLASTNOSTI ABSOLUTNÍCH SNÍMAČŮ .....	104
11.6	PRINCIP, TEORIE A VLASTNOSTI RELATIVNÍCH SNÍMAČŮ .....	108
11.7	PRINCIP A TEORIE MECHANICKÉHO MĚŘICE FREKVENCÍ .....	110
11.8	TEORIE A PROVEDENÍ NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH SNÍMAČŮ KMITÁNÍ .....	111
11.8.1	<i>Elektrodynamické snímače</i> .....	111
11.8.2	<i>Piezoelektrické snímače</i> .....	112
11.8.3	<i>Indukčnostní snímače kmitání</i> .....	115
11.8.4	<i>Kapacitní snímače kmitání</i> .....	117
11.8.5	<i>Tenzometrické snímače kmitání</i> .....	119
11.9	KALIBRACE SNÍMAČŮ KMITÁNÍ A EXPERIMENTÁLNÍHO ŘETĚZCE PRO SNÍMÁNÍ KMITŮ .....	120
11.9.1	<i>Kalibrace snímačů</i> .....	120
11.9.2	<i>Kalibrace experimentálního řetězce</i> .....	120
<b>12</b>	<b>MĚŘÍCÍ METODY PRO URČOVÁNÍ VELIČIN VYJADŘUJÍCÍCH PŮSOBNÍ NA EXPERIMENTÁLNÍ OBJEKT</b> .....	<b>121</b>
12.1	MĚŘÍCÍ METODY PRO URČOVÁNÍ SIL .....	121
12.1.1	<i>Snímače sil</i> .....	121
12.1.1.1	Teorie snímačů časově proměnných sil .....	122
12.2	PRINCIP A PROVEDENÍ NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH SNÍMAČŮ SIL .....	123
12.2.1.1	Indukčnostní snímače síly .....	123
12.2.1.2	Kapacitní snímače síly .....	123
12.2.1.3	Piezoelektrické snímače síly .....	124
12.2.1.4	Magnetoelastické snímače síly .....	124
12.2.1.5	Tenzometrické odporové snímače síly .....	124
12.3	MĚŘÍCÍ METODY PRO URČOVÁNÍ MOMENTŮ SÍLY .....	127
12.3.1	<i>Principy a provedení nejpoužívanějších snímačů momentu síly</i> .....	127
12.3.1.1	Kapacitní a indukčnostní snímače .....	127
12.3.1.2	Fázové snímače momentu síly s generátorem impulsů .....	127
12.3.1.3	Odporové tenzometrické snímače .....	128
12.4	MĚŘÍCÍ METODY PRO URČOVÁNÍ TLAKU .....	130
12.4.1	<i>Úvod</i> .....	130
12.4.2	<i>Měřicí metody a měřicí přístroje</i> .....	131
12.5	MĚŘÍCÍ METODY PRO URČOVÁNÍ TEPLoty .....	139
12.5.1	<i>Úvod</i> .....	139
12.5.2	<i>Neelektrické dotykové metody pro určování teploty</i> .....	141
12.5.3	<i>Elektrické teploměry</i> .....	143
12.5.4	<i>Bezdotykové určování teplot</i> .....	150
12.5.5	<i>Odporové foliové snímače teploty</i> .....	152
12.6	MĚŘENÍ VLHKOSTI VZDUCHU .....	154
12.6.1	<i>Úvod</i> .....	154
12.6.2	<i>Psychrometrická metoda pro měření relativní vlhkosti</i> .....	155
12.6.3	<i>Kondenzační metoda pro měření teploty rosného bodu</i> .....	156

# 1 Komplexní pojednání o experimentu

## 1.1 Vymezení experimentu

Pojem experiment je dnes jedním z velmi frekventovaných pojmů nejen v oblasti vědy a techniky, ale i v běžném životě. V souvislosti s experimentem se zcela běžně používají přívlastky: technický, vědecký, laboratorní, provozní, ekonomický, biologický, biomechanický, sportovní, reálný, počítačový, myšlenkový apod., aniž by byla vymezena jejich klasifikace. Experimenty lze členit zejména podle těchto hledisek:

### I. Hledisko typu objektu, **na němž se experiment realizuje:**

- ♦ **Reálný experiment** – je to soustava cílevědomých a cílevědomě řízených činností a prostředků k jejich realizaci, které provádí subjekt **na aktivovaném reálném objektu**, s cílem získat objektivizované informace o jeho projevech, a to na základě přímého nebo zprostředkovaného měření, resp. přímého nebo zprostředkovaného pozorování na něm, jako podklad pro řešení určitého problému na tomto nebo na jiném objektu. **Aktivace objektu** patří k základním atributům reálného experimentu. Aktivace je tím, čím se experiment odlišuje od jiných empirických činností, např. od pozorování.
- ♦ **Myšlenkový experiment** – je to soustava podvědomých a vědomých mozkových činností realizovaných **v mozku**, tvořená představami, zkušenostmi, úvahami a vědomostmi, a to o možnostech řešení problémových situací v reálném experimentu, ve vztahu k jeho využití při řešení určitého problému.
- ♦ **Počítačový experiment** – je to soustava cílevědomých činností prováděných subjektem **na počítači tak, že se opakovaně realizuje** výpočtový algoritmus určité matematické teorie pro definovanou množinu vstupních parametrů: Cílem je přispět k řešení určitého problému specifickými přístupy výpočtového modelování (simulační modelování a citlivostní analýza).

### Hledisko oboru, **v němž se experiment realizuje:**

- ♦ **Obecně XXX experiment** – kde za XXX lze dosadit jakýkoliv obor.
- ♦ **Technický experiment** – je to experiment realizovaný v oblasti techniky na technickém objektu.

### Hledisko místa realizace experimentu

- ♦ **Laboratorní experiment** – je to experiment, pro který je charakteristické, že se realizuje za předem stanovených standardních podmínek okolí experimentu, v tzv. laboratorních podmínkách.
- ♦ **Provozní experiment** – je to experiment realizovaný v provozních podmínkách objektu.
- ♦ **Přírodní experiment** – je to experiment realizovaný v přírodních podmínkách.

### Hledisko způsobu využití experimentu ve výpočtovém modelování

- ♦ **Redukční experiment** – tímto experimentem se na základě objektivizovaných měření vylučují z množiny veličin, na nichž závisí řešení problému ty, které jsou nepodstatné z hlediska řešeného problému, takže zůstanou jen veličiny významné, tvořící systém podstatných veličin  $\Sigma(\Omega)$ .
- ♦  **$\tau$ -verifikační experiment** – je to experiment realizovaný s cílem ověřit pravdivost teorie při její **deduktivní tvorbě** (intuitivně se formuluje hypotéza s následnou experimentální verifikací).
- ♦ **Formulační experiment** – s využitím výsledku tohoto experimentu se formulují **axiomy teorie (je to induktivní přístup k tvorbě teorie)**.
- ♦ **Konkretizační experiment** – je to experiment, kterým se získávají konkrétní vstupní údaje do výpočtových algoritmů příslušné teorie, použité pro řešení konkrétního problému.

- ◆ **Identifikační experiment** – je to specifický případ konkretizačního experimentu vyskytující se v identifikaci systémů. Experimentálně se určují projevy objektů, které jsou vstupními údaji do výpočtových algoritmů inverzní úlohy.
- ◆ **VM-verifikační experiment** – slouží k ověření pravdivosti výsledků výpočtového modelování.

Hledisko způsobu řízení experimentu

- ◆ **Aktivní experiment** – objekt, na němž se realizuje experiment, může subjekt aktivovat a tuto aktivaci případně i řídit. Měřené projevy objektu jsou tedy **důsledkem aktivace objektu subjektem**.
- ◆ **Simulační experiment** – pro tento experiment je charakteristické, že aktivace objektu se realizuje podle předem stanovené strategie zadávání vstupních údajů tak, aby byly experimentálně simulovány požadované procesy na objektu.
- ◆ **Plánovaný experiment** – je to experiment, který se realizuje v podmínkách plánovaného měření.
- ◆ **Experiment dávkový, zpětnovazebně řízený a interaktivní**

Hledisko cíle využití experimentu

- ◆ **Vědecký experiment** – je to experiment realizovaný v poznávacích procesech v základním výzkumu. Výsledky se využívají k rozvoji ve vědeckých, technických nebo jiných oborech.
- ◆ **Praktický experiment** – je to experiment, s jehož využitím se řeší praktické problémy, což jsou subjektem formulované konkrétní problémové situace, vymezené jako nestandardní stavy subjektů, společnosti, přírody, obecně reálných i abstraktních objektů.

## 1.2 Zobecněná struktura experimentu

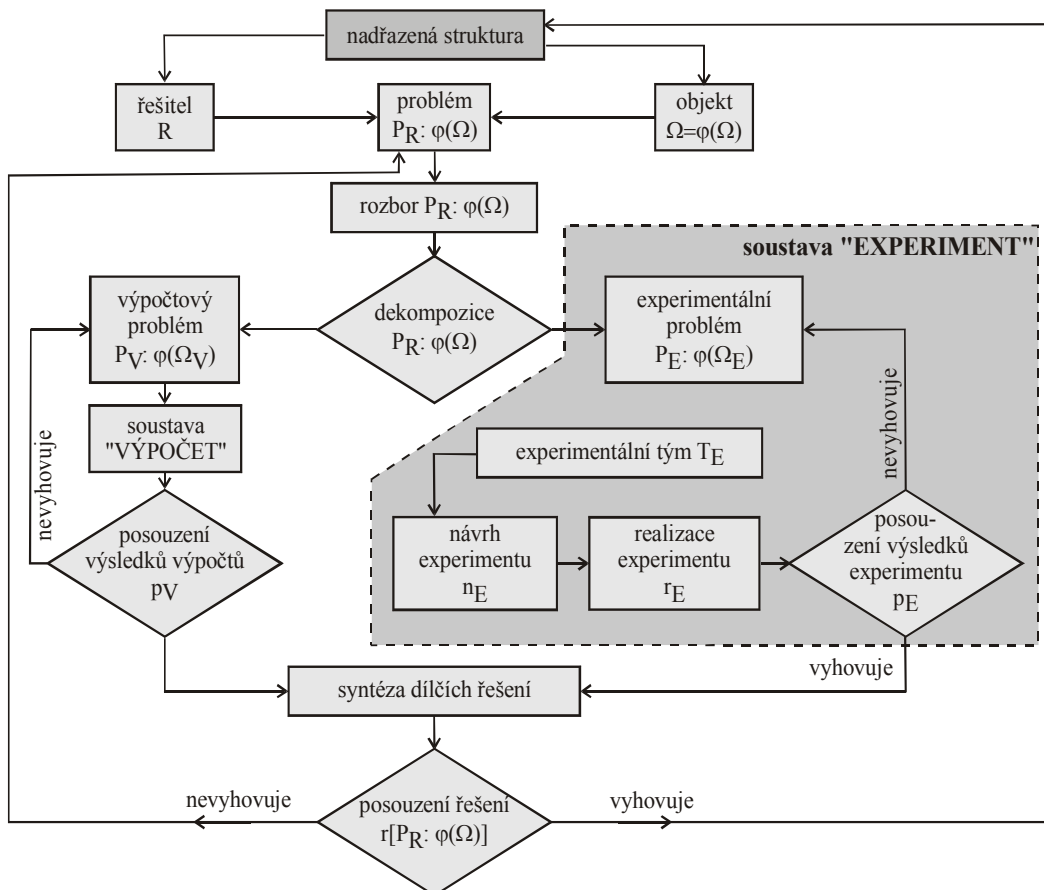
Jestliže se hovoří o struktuře určitého objektu, tím se a priori předpokládá, že tento objekt je soustavou. Další text je věnován vytvoření zobecněné struktury reálného experimentu, přičemž pojem „zobecněná“ znamená, že struktura má obecnou platnost, nezávislou na oborovém charakteru experimentálního objektu, na němž se experiment realizuje. Struktura experimentu může být vytvářena na různých rozlišovacích úrovních podrobnosti.

Vyjděme ze situace, že z určité nadřazené úrovně je vytvořen **řešitelský tým**  $R$ , který má na určitém objektu  $\Omega$  (tento objekt je obvykle považován za soustavu, což je na Obr. 1.1 zdůrazněno symbolem  $\varphi(\Omega)$ ) a na určité úrovni řešit určitý problém  $P_R(\Omega)$ . Necht' vyřešení problému  $P_R(\Omega)$  vyžaduje řešení jak výpočtového problému  $P_V(\Omega)$ , tak i řešení problému experimentálního  $P_E(\Omega)$ , (Obr. 1.1). Nutnost řešit experimentální problém může vyplývat buď ze samostatné podstaty problému, nebo je experiment nutný jako součást výpočtového modelování, v němž má několik nezastupitelných funkcí.

K řešení experimentálního problému se vyčlení **experimentální tým**  $T_E$  (může být tvořen jedním nebo více specialisty). Tento tým provede **návrh experimentu**  $n_E$ , jeho **realizaci** a **posouzení**  $p_E$  získaného **řešení**  $r[P_E(\Omega)]$ . Na nejnižší rozlišovací úrovni lze pak experiment  $E$  považovat za soustavu, jejímiž prvky jsou v předchozím textu tučně vysázené pojmy. Tyto prvky vytvářejí tzv. „**základní strukturu experimentu**“, kterou lze formálně popsat takto:

$$E = \varphi \{T_E, n_E, r_E, p_E\}.$$

Řešení problémových situací souvisejících s návrhem experimentu a s jeho realizací ovšem vyžaduje zkoumat jeho strukturu na vyšších rozlišovacích úrovních. Detailní analýze prvku „Návrh experimentu“ bude věnována samostatná stať. Zde je věnována pozornost struktuře prvku „Realizace experimentu“, jež vychází z těchto úvah:



Obr. 1.1 Základní struktura experimentu začleněná do komplexní struktury řešení problému

**1. Úvaha:** Experimentátorům je všeobecně známá tato situace související s realizací experimentu, nezávisle na tom, v jakém oboru se tento realizuje. Nutnou podmínkou k realizaci experimentu je existence materiálního objektu (*experimentální objekt  $\Omega_E$* ), na němž se experiment provádí. Tento objekt experimentátor *aktivuje*, realizuje *měření hodnot aktivačních veličin* a uskutečňuje *pozorování* nebo *měření projevů* experimentálního objektu. *Výsledky měření* hodnot aktivačních veličin a hodnot projevů experimentátor *vyhodnocuje (zpracovává)* takovým způsobem, aby byly objektivní, což vyžaduje jejich zpracování statistickými metodami. Pojmy, které byly vytištěny tučně, lze považovat za základní prvky struktury experimentu. Lze tedy konstatovat:

*Základní struktura experimentu má tyto prvky: experimentální objekt, aktivaci experimentálního objektu, měření hodnot aktivačních veličin, měření hodnot veličin vyjadřujících projevy experimentálního objektu a zpracování výsledků měření.*

Jestliže se jedná o tzv. *řízený experiment*, pak základní struktura bude rozšířená o další prvek, a to *řízení aktivace* objektu, případně i *řízení měření* projevů. Pro experiment s plánovaným měřením se základní struktura dále rozšiřuje o prvek *plánování měření*. Prvky základní struktury experimentu (vyjma prvku „experimentální objekt“) a ty entity, které byly uvedeny v dalším textu, musejí být někým navrženy, což se realizuje v *návrhu experimentu*. Všechny zmíněné *entity mají charakter procesů* a vytvářejí procesní část struktury experimentu, vymezenou takto:

*Procesní část struktury experimentu je tvořena těmito prvky: návrh experimentu, plánování měření, řízení aktivace experimentálního objektu, řízení měření projevů, realizace aktivace, měření aktivačních veličin, měření projevů objektu a zpracování výsledků měření.*

Realizaci procesní části experimentu provádí množina odborných pracovníků, pro kterou je vžitý pojem *experimentální tým  $HuW_E$* . Le též použít pojem: „*činnosti experimentálního týmu  $HuW_E$* “.

**2. Úvaha:** Je samozřejmé, že veškeré činnosti, které je nutno realizovat v rámci experimentu, vyžadují, aby členové experimentálního týmu měli k dispozici určité technické prostředky  $HW_{Ei}$ . Tyto prvky vytvářejí **technickou (přístrojovou) strukturu experimentu**, všeobecně označovanou jako „**experimentální řetězec  $HW_E$** “.

Dílními prvky experimentálního řetězce jsou tyto dílní řetězce: řídicí  $HW_r$ , aktivační  $HW_a$ , měřicí  $HW_m$ , vyhodnocovací  $HW_v$ . První dva dílní řetězce tvoří **aktivační část**, druhé dva dílní řetězce **odezvvou (projevovou) část experimentu**. Vazba mezi nimi se realizuje přes experimentální modelový objekt  $\Omega_E$ . Dílní řetězce jsou tvořeny příslušnou experimentální technikou.

U experimentu s konkrétním oborovým zaměřením a vymezeným cílovým chováním lze provést detailnější dekompozici všech dílních řetězců na úrovni přístrojů, odpovídající příslušnému způsobu řízení a aktivace  $\Omega_E$ , použité měřicí metodě a způsobu zpracování výsledků měření. Lze tedy konstatovat:

*Technická část struktury experimentu je tvořena těmito prvky: řídicím řetězcem  $HW_r$ , aktivačním řetězcem  $HW_a$ , měřicím řetězcem  $HW_m$ , a vyhodnocovacím řetězcem  $HW_v$ .*

**3. Úvaha:** Veškeré činnosti v rámci experimentu, tedy jednotlivé prvky procesní části experimentu, jsou realizovány s využitím příslušných teorií, jejichž průnik tvoří „**teorii experimentu  $\tau_E$** “. Jejimi prvky jsou tyto dílní teorie:

- **Teorie plánování měření  $\tau_p$**  – je to teorie o tom, jak *kombinovat* jednotlivé aktivační veličiny a jaké mají mít hodnoty, aby byla zaručena optimální relace mezi rozsahem měření a statisticky nejpříznivější úrovní měření získaných informací.
- **Teorie řízení  $\tau_r$**  – tato teorie je tvořena *teorií řízení aktivace* experimentálního objektu  $\Omega_E$  a *teorií řízení měření* aktivačních veličin a veličin charakterizujících projevy objektu.
- **Teorie aktivace  $\tau_a$  experimentálního objektu  $\Omega_E$**  – *aktivací je chápán takový proces působení okolí experimentálního objektu  $\Omega_E$*  na tento objekt, který vyvolá jeho měřitelné projevy. Aktivací může být zatěžování, buzení, uvedení do provozu, v medicíně aplikace léků, elektrické podráždění, ve společenské oblasti např. vypsání voleb nebo referenda apod.
- **Teorie měřicích metod  $\tau_{mm}$**  – je to teorie fyzikálního jevu využívaného při měření příslušné fyzikální veličiny, např. termoelektrický jev se využívá při měření teplot.
- **Teorie měřicích soustav  $\tau_{ms}$**  – je to teorie uspořádání měřicího řetězce z hlediska realizace příslušné měřicí metody, dále teorie přenosu signálů měřicím řetězcem. Patří sem i problematika určování statických, dynamických, informačních a spolehlivostních vlastností měřicích přístrojů.
- **Teorie vyhodnocení (zpracování) výsledků měření  $\tau_v$**  – je to teorie o statistickém zpracování výsledků měření odpovídající statistickou metodou.

**Souhrnně lze pak konstatovat:**

*Teoretická část struktury experimentu (teorie experimentu  $\tau_E$ ) je tvořena těmito prvky:*

*teorií plánování měření  $\tau_p$ , teorií řízení  $\tau_r$ , teorií aktivace  $\tau_a$  experimentálního objektu  $\Omega_E$ ,*

*teorií měřicích metod  $\tau_{mm}$ , teorií měřicích soustav  $\tau_{ms}$  a teorií vyhodnocení výsledků měření  $\tau_v$ .*

**4. Úvaha:** Příslušné dílní teorie, které jsou součástí „teorie experimentu“, je vhodné algoritmizovat, čímž se vytvoří odpovídající dílní programová vybavení  $SW_i$ . Množina dílních programových vybavení vytváří programové vybavení experimentu, označené jako „**programové vybavení  $SW_E$** “. Lze konstatovat:

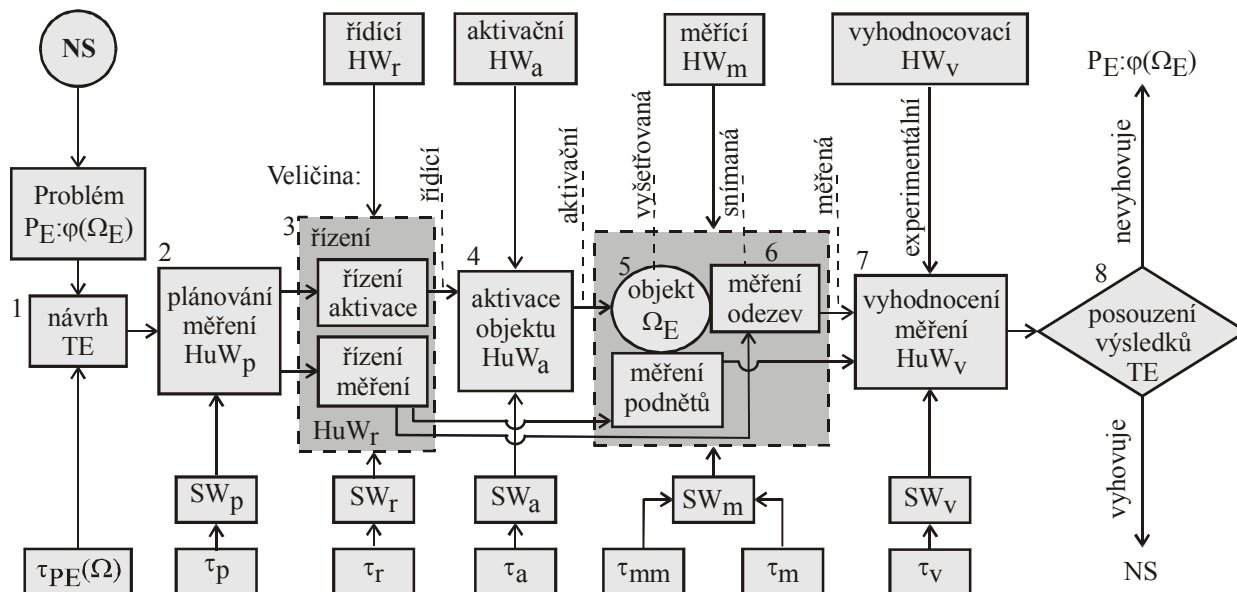
*Programová část struktury experimentu je tvořena programovým vybavením  $SW_E$  pro tyto procesy: plánování měření, řízení aktivace, řízení měření aktivačních veličin a projevů objektu, měření aktivačních veličin, měření projevů objektu a vyhodnocení výsledků měření.*

Sjednocením procesní, technické, teoretické a programové části experimentu se získá komplexní zobecněná struktura experimentu, vymezená takto:

*Komplexní zobecněná struktura experimentu je sjednocením procesní, technické, teoretické a programové části struktury experimentu.*

Adjektivum „komplexní“ znamená, že struktura experimentu obsahuje všechny podstatné prvky experimentu. Adjektivum „zobecněná“ vyjadřuje, že tato struktura má nadoborovou platnost, tedy že platí pro experiment v jakémkoliv oboru.

**5. Úvaha:** Tou *podstatou*, která odlišuje experiment od ostatních empirických činností je vědomá a cílevědomá *aktivace objektu*, na němž se experiment realizuje. Pro *pozorování, jako samostatnou empirickou činnost*, je tedy charakteristické, že se o objektu získávají informace, aniž by byl tento subjektem aktivován. Zde je nutno poznamenat, že pozorování může být též empirickou činností jako součástí experimentu.



Obr. 1.2 Komplexní zobecněná struktura experimentu

### 1.3 Chování experimentu

Pojem *chování experimentu* není mezi experimentátory běžně používán. Zde je vymezen tento pojem v souladu s obecnou teorií systémů, podle níž je chování soustavy vymezeno jako určitý stav  $S_T$  na výstupu ze soustavy (je to vlastně množina projevů soustavy), dosažený po určité cestě soustavou  $C$ . Stav  $S_T$  se označuje jako *efekt chování*  $\varepsilon_Q$ , popsáný souborem *parametrů efektu chování*  $\{p_{ei}\}$  a kvantifikovaný *hodnotami parametrů chování*  $\{h_{pi}\}$ . V případě experimentu jsou těmito parametry výsledky experimentálních činností po realizaci konkrétního experimentu. Chování soustavy je vždy nutno posuzovat ve vztahu k jejímu okolí, které tuto soustavu aktivuje i ovlivňuje. Chování experimentu  $Q_E$  lze vymežit takto:

*Chování experimentu  $Q_E$  je určeno množinou projevů experimentu (souborem parametrů efektu chování), které jsou odezvou na aktivaci experimentálního objektu  $\Omega_E$ , přičemž tato odezva je ovlivňována kolím  $O_{SE}$  ovlivňující část experimentu i okolím  $O_{PE}$  ovlivňující část experimentu.*

Výběr souboru parametrů  $p_{ei}$  efektu chování  $\varepsilon_Q$  a vymezení hodnot  $h_{pi}$  parametrů  $p_{ei}$  se v teorii systému označuje jako realizace *strategie soustavy*, kterou obvykle formuluje nadřazená struktura v souladu s cílem experimentu. Chování experimentu  $Q_E$ , odpovídající vymezené strategii experimentu, lze označit jako *cílové chování experimentu  $Q_E^*$* .

Výběr, vymezení a kvantifikace parametrů efektu chování u experimentu souvisí s jeho oborovým zaměřením a s jeho úlohou v řešení konkrétní problémové situace. Kvantifikace parametrů chování pak souvisí s úrovní řešení problémů, pro které jsou získávány *výstupy*

*experimentu*, a dále s rozsahem a obsahem nadřazených restrikcí.

Soubor parametrů  $p_{\alpha}$  efektu chování experimentu tvoří tyto entity:

- **množina experimentálních veličin**  $V_E$  (výstupů experimentu); výběr typů těchto fyzikálních veličin souvisí s problémovým zaměřením experimentu,
- **informační obsah**  $I_E$  jednotlivých experimentálních veličin  $V_E$ ,
- **množina chybových funkcí**  $\chi_E$ , které charakterizují kvalitu jednotlivých experimentálních veličin  $V_E$ ,
- **doba odezvy chování**  $\mathcal{O}_E$ , kterou lze chápat např. jako dobu mezi aktivací a odezvou experimentálního objektu, jako dobu mezi započítáním řízení aktivace tohoto objektu a získáním měřené veličiny apod.,
- **časová veličina**  $T_E$ , která je charakterizována celkovou časovou náročností experimentu,
- **hodnotová veličina**  $H_E$ , která charakterizuje celkové náklady k získání a uchování množiny veličin  $V_E$ .

Parametry  $V_E, I_E, \chi_E, \mathcal{O}_E$  lze označit jako **problémové parametry** a zcela obdobně parametry  $H_E, T_E$  jako **procesně-hodnotové parametry**. Problémové a procesně-hodnotové parametry souhrnně charakterizují efekt chování  $\varepsilon_Q$  experimentu, což je množina:

$$\varepsilon_Q = \{V_E, I_E, \chi_E, \mathcal{O}_E, H_E, T_E\}.$$

Uvedené veličiny jsou závislé na celé řadě parametrů souvisejících s procesem experimentu:

- **Hodnotová veličina**  $H_E$  závisí na počtu opakovaných měření  $n_E$  a počtu  $\nu$  měřených veličin, na pořizovacích a provozních nákladech technických zařízení  $HW_E$ , na složitosti programových vybavení  $SW_E$ , na poplatcích za pronájem prostorů, na mzdách, režii atd.
- **Chybová veličina**  $\chi_E$  taktéž závisí na veličinách  $n_E$  a  $\nu$ , dále na kvalitě  $HW_E$  i  $SW_E$ , na znalostní úrovni a spolehlivosti členů experimentálního týmu, na fyzikálních a psychologických podmínkách, za nichž probíhá experiment.
- **Časová veličina**  $T_E$  taktéž závisí na veličinách  $n_E, \nu$ , na kvalitě  $HW_E, SW_E$  a na časoprostorových podmínkách souvisejících s nadřazenými restrikcemi.

Veličina  $H_E$  se vyjadřuje v jednotkách měny, veličina  $T_E$  v jednotkách času, veličina  $\chi_E$  může být vyjádřena statistickými charakteristikami experimentálních veličin (rozptylem, konfidenčním intervalem apod.). Z rozboru vlivu parametrů na veličiny  $H_E, \chi_E, T_E$  zřejmé, že závisí na parametrech  $n_E, \nu$ . Vyloučením těchto parametrů lze získat vzájemné závislosti mezi  $H_E, \chi_E, T_E$ .

Vzhledem k reálným podmínkám realizace experimentu (realizuje se v konkrétních časových, prostorových, ekonomických a psychologických podmínkách, s určitou úrovní  $HW_E, SW_E, HuW_E$ ) je obtížné realizovat cílové chování  $Q_E^*$ . Budou tedy existovat určitá **reálná chování experimentu**  $Q_E^r$ , charakterizovaná reálnými hodnotami parametrů  $I_E^r, \chi_E^r, \mathcal{O}_E^r, H_E^r, T_E^r$ .

Rozdíly mezi parametry charakterizujícími reálné chování a hodnotami parametrů  $I_E^*, \chi_E^*, \mathcal{O}_E^*, H_E^*, T_E^*$  představujícími cílové chování označme symboly  $D_I, D_\chi, D_{\mathcal{O}}, D_H, D_T$ , např.  $D_\chi = \chi_E^r - \chi_E^*$ . Veličiny  $D_I$  až  $D_T$  (obecně  $D_i$ ) označme jako **parametry odchylek reálného chování experimentu** od jeho cílového chování. Pro další rozbor je důležité si uvědomit, že:

- u informačního obsahu  $I_E$  je hodnota  $I_E^*$  minimální hodnotou,
- u chybové funkce  $\chi_E$  je hodnota  $\chi_E^*$  maximální hodnotou.

Z uvedeného vyplývá, že situace, pro které platí:

- $I_E^r < I_E^*, \chi_E^r > \chi_E^*$  jsou nepřipustné. První situace vyjadřuje, že informační obsah veličin  $V_E$  získaných experimentem je menší než bylo požadováno. Druhá situace značí, že hodnoty veličin charakterizující chybové funkce veličin  $V_E$ , a tedy kvalitu měření jsou horší, než byl požadováno.
- $I_E^r \gg I_E^*, \chi_E^r \ll \chi_E^*$  jsou přípustné, mohou ovšem způsobit nárůst hodnot parametrů  $H_E^r, T_E^r$ , a jsou tedy „zbytečným přepychem“.

Bude-li se chování experimentu posuzovat podle reálně dosahovaných hodnot parametrů efektu chování, podle velikosti a časových průběhů odchylek, kvality interakcí a vazeb experimentu na jeho okolí, lze zavést následující typy chování technického experimentu (dále je u veličin vypuštěn index E):

- ◆ **Ideální chování**, platí-li:  $\chi^r = 0, \quad D_I = 0, \quad D_H = 0,$   
 $D_T = 0.$

Tento typ chování je prakticky nerealizovatelný. Nelze totiž dosáhnout nulové hodnoty chybové funkce  $\chi^r$ , a to v důsledku existence statických a dynamických chyb prvků experimentálního řetězce, parazitního vlivu okolí na proces experimentu apod. Veličiny  $D_H$ ,  $D_T$  jsou ovlivňovány pohyby cen za  $HW_E$ ,  $SW_E$ , časovými skluzy v měření apod.

- ◆ **Normální chování**, platí-li:  $D_\chi \cong 0, \quad D_I \cong 0, \quad D_H \cong 0,$   
 $D_T \cong 0.$

To znamená, že reálné chování experimentu se odchyluje od ideálního nevýznamně, tedy, že odchylky parametrů  $D_i$  leží v přijatelných tolerančních mezích. V tomto chování jsou vzniklé odchylky způsobené přirozeným, tedy **normálním chováním soustavy**.

- ◆ **Adaptabilní chování**, pro něhož charakteristické, že reálné chování experimentu se může přiblížit chování cílovému, a to realizací určitých mimořádných opatření (adaptací soustavy), zejména těchto:

- buď na stejné struktuře  $\S$  experimentu změnou hodnot parametrů prvků této struktury (např. použití kvalitnějších tenzometrických snímačů),
- nebo změnou struktury  $\S$  na jinou strukturu, označenou  $\S'$  zařazením jiných prvků, např. změnou měřících metod, změnou metod zpracování výsledků měření apod.

Realizace mimořádných opatření sice vede ke zlepšení odchylek  $D_I$ ,  $D_\chi$ , může však způsobit nárůst odchylek  $D_H$ ,  $D_T$ . Před realizací opatření tedy pro adaptabilní chování platí:

$$D_I \neq 0, \quad I^r < I^*; \quad D_\chi \neq 0, \quad \chi^r > \chi^*; \quad D_H \cong 0; \\ D_T \cong 0.$$

Pro adaptaci soustavy pak platí:

$$D_I \cong 0, \quad I^r \cong I^*; \quad D_\chi \cong 0; \quad \chi^r < \chi^*; \quad D_H > 0; \\ D_T > 0.$$

- ◆ **Mutační chování**, jestliže existující struktura  $\S$  experimentu neumožňuje realizovat normální ani adaptabilní chování, je však možná změna struktury vedoucí k jinému cílovému chování (mutace chování), které taktéž umožňuje řešit nadřazený problém. Nové cílové chování je charakterizováno např. jinými experimentálními veličinami  $\bar{V}_E$  a v návaznosti na tuto změnu i jiným potřebným informačním obsahem  $\bar{I}_E$ , jinými hodnotami chybových veličin  $\bar{\chi}_E$  nebo i jinými chybovými veličinami  $\bar{\chi}_E$ . Je tedy charakterizováno jiným efektem chování soustavy  $\bar{\varepsilon}_Q$ . Těmto změnám obvykle odpovídá i změna cesty soustavy, z cesty  $C^r$  na  $\bar{C}^r$ .

Před mutací tedy např. platí:

$$D_I \cong 0, \quad I^r < I^*; \quad D_\chi \neq 0, \quad \chi^r < \chi^*; \quad D_H \cong 0; \\ D_T \cong 0; \quad C^r \subset \S,$$

po mutaci pak:

$$D_I \cong 0, \quad \bar{I}^r \cong I^*; \quad D_\chi \cong 0, \quad \bar{\chi}^r < \chi^*; \quad D_H \cong 0; \\ D_T \cong 0; \quad C^r \subset \S.$$

Jako ilustraci mutačního chování je možno uvést příklad z oblasti identifikace stykového tlaku mezi dvěma tělesy. Tento tlak lze identifikovat s využitím experimentálně získaných poměrných přetvoření  $\varepsilon$  nebo posuvů  $u$  v blízkém okolí stykové plochy. Pokud se ukáže, že chybové veličiny  $\chi_u^r$  experimentálně určených posuvů jsou větší než jsou potřebné hodnoty  $\chi_u^*$  na vstupu do identifikačního výpočtu, je možno prošetřit alternativu, u níž se identifikace bude provádět z naměřených přetvoření. Tím se změní cílové chování experimentu, protože



cílem nebude určit posuvy, ale přetvoření, k čemuž je nutné změnit strukturu měřicího řetězce.

- ◆ **Degenerativní chování** – dochází k postupnému resp. k náhlému zvětšování odchylek chybových veličin  $\chi_{Ei}$ . Příčinou mohou být degradační změny vlastností prvků soustavy, ať již charakteru technického (stárnutí resp. opotřebování prvků experimentálního řetězce) nebo morálního stárnutí např. u prvků programového vybavení  $SW_E$ . Tento typ chování lze dále členit na:
  - **poruchové chování** – příčinou je postupná nebo náhlá porucha, přičemž existuje reálná možnost odstranit tuto poruchu opravou nebo výměnou nefunkčního prvku,
  - **havarijní chování** – příčinou je porucha, jejíž odstranění není krátkodobou záležitostí,
  - **katastrofické chování** – dochází k rozpadu celé struktury experimentu, kterou nelze zrekonstruovat.
- ◆ **Odmítnuté chování** – obecně se jedná o případy, u nichž neexistuje vstup do okolí soustavy, ať již nerealizovatelností interakce na existující vazbě, nebo ztrátou vazby. V případě experimentu to znamená, že jeho výstupy nejsou přijaty nadřazenou strukturou. Důvodem nepřijetí může být např. nízký obsah informací, nepodložená objektivnost informací, vysoké hodnoty chybových funkcí  $\chi_{Ei}$ , zánik odběratele informací, finanční nesolventnost tohoto odběratele, ztráta zájmu o informace apod.
- ◆ **Nerealizovatelné chování** – patří sem případy, u nichž nelze realizovat soustavu s požadovaným cílovým chováním. V případě experimentu to může být z důvodů neexistující teorie pro měření určité fyzikální veličiny, neexistujícího programového resp. měřicího zařízení. Dodnes existuje celá řada experimentálně neřešitelných problémů. Je to např. měření kontaktních tlaků, měření přetvoření uvnitř těles, určování silového působení ve svalech uvnitř těla apod.

## 1.4 Přípravná etapa experimentu

Při tvorbě struktury přípravné etapy experimentu lze vyjít ze situace, že z určité nadřazené struktury je zadán inženýrský problém  $P$  na objektu  $\Omega$  a k jeho řešení je vytvořen řešitelský tým  $R$ . Tato situace, je následující. Necht' v rámci řešení  $P_R(\Omega)$  je nutné řešit experimentální problém  $P_E(\Omega_E)$  na experimentálním objektu  $\Omega_E$ . Řešit tento problém vyžaduje realizovat určitý experiment, čemuž předchází dvě důležité etapy, a to přípravná a návrhová. Přípravné etapě je věnován tento odstavec, návrhové etapě odstavec následující.

Hlavní náplní přípravné etapy experimentu je analýza problémových situací v okolí experimentu: a to ve vztahu k formulaci experimentálního problému a k podstatným okolnostem souvisejícím s problémem zadaným z nadřazené struktury (**vnější analýza**), souvisejících se zajištěním realizace experimentu, zejména s problémy v etapě návrhu a v etapě sestavování jeho struktury (**vnitřní analýza**).

Před návrhem experimentu je vhodné si uvědomit, že existuje **scénář přípravné etapy**, jehož cílem je přispět k racionálně orientovanému rozhodování o takovém návrhu experimentu, který zajistí jeho cílové chování.

**Obsah scénáře** vychází z obecné analýzy problémové situace. Scénář má tyto kroky:

1. **Analýza situace v nadřazené struktuře**, především seznámení se s jejími cíli, záměry a potřebami, které vedly k formulaci experimentálního problému  $P_E(\Omega_E)$ . Výsledky analýzy mohou být prospěšné:
  - pro experimentální oblast, protože umožní na vyšší úrovni provádět další rozborů v rámci přípravné etapy,
  - pro nadřazenou strukturu, protože mohou přispět k novým podnětům při řešení problému  $P_R(\Omega_E)$ , který je nadřazen problému  $P_E(\Omega_E)$ .
2. **Analýza formulace problému**  $P_E(\Omega_E)$  pro experimentální oblast. Formulace je většinou poplatná úrovni poznání jeho zadavatele, jeho oborovému zaměření a v něm vžitě terminologii. Výsledkem analýzy je velmi často věcné i formální přeformulování problému z

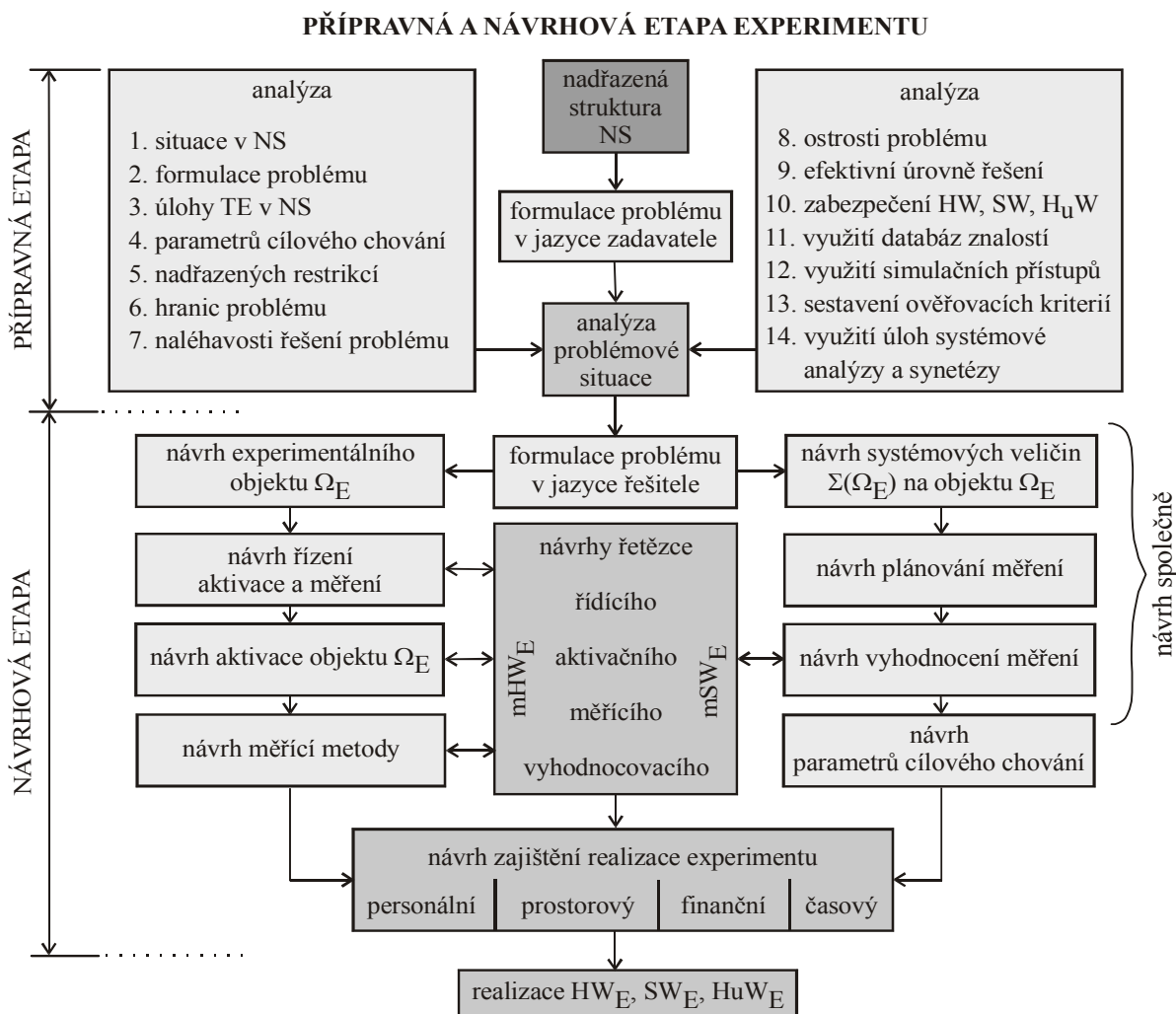
jazyka zadavatele do jazyka řešitele. Při formulaci problému je vhodné uvědomit si jednu ze zásad operačního výzkumu, a to, že **úloha dobře formulovaná je z poloviny vyřešena**. Obtížnost procesu **reformulace problému** je úměrná oborové rozdílnosti zadavatele a řešitele a je typická pro interdisciplinární obory jako biomechaniku apod.

3. **Analýza úlohy a typu experimentu**; jde o rozbor, zda se jedná o experiment řídicí, experiment konkretizační (získání údajů do databank údajů), či experiment, který je součástí materiálního, resp. výpočtového modelování při řešení problémových situací v různých etapách technického života technických objektů.
4. **Analýza parametrů cílového chování experimentu**
5. **Analýza souboru vymezení a omezení** (tzv. nadřazené restriktce) pro řešení ze strany zadavatele, přičemž prvky tohoto souboru mají charakter informační, finanční, časový, personální, místa realizace experimentu apod.
6. **Vymezení hranic problému** obvykle souvisí s touto situací. Systémový přístup vyžaduje řešení problémů v jejich vnitřních a vnějších souvislostech, což může vést k neúměrnému rozrůstání dílčích problémových situací souvisejících se základním problémem. Proto je důležité zabývat se rozlišovací úrovní, tj. *stupněm podrobnosti*, s níž problém řešíme. Někdy je účelné formulovat problém na více rozlišovacích úrovních.
7. **Analýza stupně naléhavosti řešení problému**, který může mít rozmezí od problémů řešících havarijní situace technických objektů až po prozatím předvídané problémové situace.
8. **Vymezení stupně ostrosti (mlhavosti, rozmazanosti, neurčitosti) problému**. Problém považujeme za ostrý, jestliže lze dostatečně přesně vymežit všechny kroky jeho řešení. V oblasti experimentu to znamená správně a obsahově věcně formulovat experimentální problém, věcně formulovat cíle, jež se mají řešením experimentu dosáhnout, vymežit podmínky, za nichž se bude experiment realizovat, zjistit, zda jsou k dispozici prvky, z nichž lze sestavovat strukturu experimentu a zajistit jeho cílové chování.  
Čím neurčitěji lze formulovat obsah, cíle atd., tím je problém méně ostrý. Lze tedy hovořit o *stupni ostrosti* (rozmazanosti) *problémově formulačním, realizačním, stabilitním* apod.
9. **Určení efektivní úrovně řešení** experimentálního problému  $P_E(\Omega_E)$ . Jedná se o stanovení počtu aktivačních, řídicích a měřících míst, zatěžovacích stavů, opakovaných měření, hodnot chybových parametrů apod.) ve vztahu k nadřazenému problému  $P_R(\Omega)$  tak, aby vše bylo úrovněově vyvážené.
10. **Analýza možností přístrojového, programového, personálního a prostorového zabezpečení experimentu**. Obsahové náplně jednotlivých zabezpečení jsou zřejmě z předchozího textu.
11. **Posouzení využití databankových systémů** vědeckotechnických informací o přístrojových a programových prvcích struktury experimentu, dále počítačově zpracovaných zkušeností o obdobných experimentech, použití expertních a znalostních systémů.
12. **Posouzení potřeby využití simulačních přístupů** využívajících např. počítačový experiment. Je to obdoba využití simulované identifikace pro návrh identifikačních experimentů.
12. **Analýza možností verifikace věrohodnosti řešení** experimentálního problému a sestavení ověřovacích kritérií. Verifikace výsledků experimentu je složitější, než verifikace výsledků výpočtového modelování, u něhož je právě experiment verifikačním prostředkem. V případě experimentu se tento musí verifikovat např. jinou měřící metodou, v jiných prostorových podmínkách, jiným experimentálním týmem apod.
13. **Analýza využití úloh systémové analýzy a syntézy** při řešení problémových situací experimentu. K prostředkům, které lze využít při analýzách a rozborech v přípravné etapě, lze řadit: různé formy výměny informací mezi zadavatelem experimentálního problému, jeho řešitelem a uživatelem výsledků experimentu, dále panelové diskuse, expertní odhady, brainstorming, delfskou metodu apod.

## 1.5 Návrhová etapa technického experimentu

Struktura návrhové etapy experimentu byla vytvořena na základě zobecněných poznatků o návrzích a realizacích experimentů, Obr. 1.3. V dalším textu jsou detailněji analyzovány podstatné prvky této struktury.

- ♦ **Formulace problému**  $P_E(\Omega_E)$  v jazyce řešitele. Výsledky analýz v přípravné etapě mohou vést k reformulaci původně zadaného problému  $P_R(\Omega)$  nadřazenou strukturou.



Obr. 1.3 Scénář přípravné a návrhové etapy experimentu

- ♦ **Návrh experimentálního objektu**  $\Omega_E$  souvisí s úlohou experimentu v příslušném oboru a s jeho typem v modelování. Návrh objektu  $\Omega_E$  patří do neformalizovatelných činností; lze ovšem uplatnit znalosti a zkušenosti. Experimentální objekty mohou mít různý charakter.
  - V podobnostním materiálovém modelování je objekt  $\Omega_E$  podobný objektu  $\Omega$ , na němž se řeší problém  $P_R(\Omega)$  ve smyslu teorie podobnosti a má shodnou materiální a strukturální část (např. geometricky zmenšená turbína).
  - V analogovém modelování má  $\Omega_E$  obecně odlišnou strukturální, materiální a procesní část než objekt  $\Omega$ .
  - U verifikačních experimentů ve výpočtovém modelování, ověřujícím vlastnosti a chování vzniklého technického objektu, je experimentálním objektem  $\Omega_E$  přímo  $\Omega$ , nebo prototyp, resp. objekty z nulové série.

Ve struktuře návrhu experimentu existují prvky „návrh systému veličin  $\Sigma(\Omega_E)$  na  $\Omega_E$ “, „vyhodnocení výsledků měření“ a „plánování měření“, pro které je společné, že se v nich pracuje se systémem veličin  $\Sigma(\Omega_E)$  podstatných z hlediska řešeného problému, a že činnosti spojené jak s návrhem, tak i s realizací těchto prvků **nelze provádět izolovaně**. Vytvořením systému  $\Sigma(\Omega_E)$  je totiž vymezena teorie  $\tau_v$  pro zpracování výsledků měření a té zase

odpovídá příslušná teorie  $\tau_p$  pro plánování měření. Uvedené prvky vytvářejí důležitou dílčí soustavu a mají následné vymezení.

- ◆ **Vytvoření systému**  $\Sigma(\Omega_E)$  – již ve fázi návrhu experimentu musí být vytvořena výchozí úvaha o veličinách vyjadřujících podněty na  $\Omega_E$  a o veličinách vyjadřujících odezvy  $\Omega_E$  na tyto podněty, a to z hlediska jejich vzájemných vazeb, závislostí na čase, resp. na poloze  $\Omega_E$  v prostoru, především však z hlediska jejich významnosti ve vztahu k řešenému problému. Jde tedy o vytvoření systému veličin  $\Sigma(\Omega_E)$  z hlediska problému  $P_E(\Omega_E)$  řešeného na  $\Omega_E$  (zjišťování vlastností a chování  $\Omega_E$ , jeho řízení apod.).

Vytvořený systém  $\Sigma(\Omega_E)$  je neúplný a právě cílem měření a jeho zpracování je tento systém konkretizovat (experimentálně kvantifikovat veličiny a vazby mezi nimi). Vytváření systému  $\Sigma(\Omega_E)$  je obecně neformalizovatelná činnost. Při jeho vytváření se využívají znalosti o objektu a o fyzikálních podstatách jevů na něm probíhajících a experimentálně konkretizovaných. Jde o činnost, označovanou jako *umění modelovat*, při níž se využívá heuristika, intuice, vědomosti a znalosti.

V literatuře se vytvoření systému  $\Sigma(\Omega_E)$  často označuje jako vytvoření matematického modelu experimentálně určovaného chování, jevů nebo vlastností objektu  $\Omega_E$ . V pojetí této publikace jde o vytvoření systému veličin  $\Sigma(\Omega_E)$  vytvořením struktury matematického popisu tohoto chování, jevů či vlastností  $\Omega_E$ .

- ◆ **Vyhodnocení výsledků měření a plánování měření** – vytvořením systému veličin  $\Sigma(\Omega_E)$  je bezprostředně určena i metoda pro zpracování a vyhodnocení výsledků měření a metoda pro jeho plánování. Typy těchto metod závisí na typu nezávislých veličin (spojité, diskrétní, číselné (kvantitativní), logické (kvalitativní), fuzzy (neostré) ), na charakteru vazeb mezi nezávislými a závislými veličinami (lineární, polynomické, exponenciální apod.) a na jejich časových průbězích.

Důležité je uvědomit si, že plánování měření nemůže samo o sobě přispět ke zvýšení úrovně matematického popisu chování, jevů nebo vlastností objektu  $\Omega_E$ , může pouze zlepšit statistické charakteristiky experimentálně určovaných veličin, jejich vzájemných příčinných nebo časových závislostí.

- ◆ **Návrh parametrů cílového chování experimentu** – problematika souboru parametrů cílového chování experimentu byla detailněji analyzována dříve. Konkretizace těchto parametrů souvisí s těmito prvky návrhu experimentu:
  - s vytvořením systému  $\Sigma(\Omega_E)$  – jde o návrh veličin  $V_E$  charakterizujících výstupy z experimentu a chybových funkcí  $\chi_E$ ;
  - s plánováním a vyhodnocováním měření; jde o výběr a způsob kvantifikace chybových funkcí  $\chi_E$ ;
  - s měřicí metodou, ve vztahu k dosažitelnému informačnímu obsahu měřených veličin (počet zatěžovacích stupňů, dále bodová, celoplošná měření apod.) a k rychlosti odezev na podněty.
- ◆ **Výběr měřicí metody** – má mezi prvky návrhu experimentu prioritní postavení, protože nejprve je nutno znát, zda příslušnou veličinu v systému  $\Sigma(\Omega_E)$  je možno experimentálně určit a až pak uvažovat o plánování a vyhodnocování měření. Výběr měřicí metody patří do oblasti mnohokriteriálního rozhodování. Ke kritériím výběru patří zejména druh měřené veličiny, její časový průběh, rozsah měřených hodnot, teplotní, prostorové a časové podmínky měření, přístupnost a viditelnost měřících míst, rozsah a jakost měřené informace atd. Výběr je též ovlivňován úrovní znalostí experimentálního týmu, dostupností příslušného přístrojového a programového vybavení, ekonomickými a časovými okolnostmi apod. Při výběru je nutno respektovat zásadu úrovně vyváženosti s jinými prvky struktury experimentu, zásadu optimálního využití vlastností metody a zásadu vhodné kombinace měřících metod.

Výběr měřicí metody patří doposud k neformalizovaným činnostem. Rozvoj nových vědních disciplín a oborů (fuzzy matematika, znalostní inženýrství, umělá inteligence,

informatika atd.) s nezastupitelným využitím počítačů otvírá v současnosti možnosti pokusit se při výběru měřicí metody využít expertní systémy.

- ◆ **Návrh experimentálního řetězce – k jeho návrhu se využívá výsledků doposud analyzovaných prvků návrhu experimentu.** Prvky jeho dílčích řetězců (řídícího, aktivačního, měřícího, vyhodnocovacího) souvisí s oborovou orientací experimentu, s typem veličin v systému  $\Sigma(\Omega_E)$ , s cílem experimentu, s hodnotami parametrů cílového chování experimentu apod. Metodika návrhu a konstruování dílčích řetězců a jejich propojení je v obecných základech shodná s metodikou konstruování jiných objektů. V současnosti se vytvářejí předpoklady k tomu, aby se přecházelo od intuitivně-znalostního přístupu k přístupům rozpracovaným v disciplíně označované jako **projektování systémů** (v našem pojetí projektování soustav), které využívají úlohy systémové analýzy a syntézy.

## 1.6 Struktura klasického výpočtového modelování

Strukturu klasického výpočtového modelování obsahuje tyto „**prvky výpočtového modelování**“ (jsou označeny symbolem  $PV_i$ ):

1. formulace oborového problému  $P(\Omega)$ ,
2. vytvoření systému relevantních veličin  $\square(\Omega)$  na  $(\Omega)$  ve vztahu k  $P(\Omega)$ ,
3. vytvoření dílčích modelů  $M_i$  (topografie a geometrie objektu, okolí objektu, aktivace a ovlivňování objektu, vlastností struktury, procesů, stavů a projevů objektu, mezních stavů objektu atd.),
4. vytvoření dílčích systémů veličin  $\Sigma(\Omega)_i$  pro jednotlivé dílčí modely  $M_i$ ,
5. výběr matematické teorie  $\tau_\Omega$  související se systémem veličin  $\Sigma(\Omega)$ ,
6. výběr metody řešení
7. vytvoření a odladění odpovídajícího výpočtového algoritmu  $A_v$  a programového vybavení  $SW_v$ ,
8. vytvoření množiny vstupních údajů do výpočtového algoritmu,
9. výběr výpočtových prostředků (počítač),
10. proces realizace výpočtového algoritmu,
11. zpracování výsledků řešení,
12. analýza výsledků řešení,
13. ověření pravdivosti výsledků výpočtového modelování,
14. syntéza dosažených výsledků řešení do databáze znalostí.

## 1.7 Úloha experimentu ve výpočtovém modelování

Pro výpočtové modelování je charakteristická aktuální preference výpočtu a aktuální absence experimentu, což ovšem nevylučuje možnost interakcí výpočtového modelování s experimentem. Ten má v něm nezastupitelné místo, a to v jeho různých etapách a s různým posláním, jak je dále rozvedeno.

- Prvním krokem ve výpočtovém modelování, hned po formulaci problému, je vytvoření systému veličin  $\Sigma(\Omega)$  na objektu  $\Omega$ , na němž se řeší určitý problém  $P_R(\Omega)$ . K vytvoření systému  $\Sigma(\Omega)$  může sloužit tzv. **redukční experiment**, kterým se na základě objektivizovaných měření vylučují ty veličiny a vazby v systému  $\Sigma(\Omega)$ , které jsou nepodstatné z hlediska řešeného problému. Podle toho, co je předmětem našeho zájmu na objektu  $\Omega$ , lze redukční experiment členit na:
  - **experiment strukturní** – vylučují se nepodstatné prvky a vazby ve struktuře objektu  $\Omega$ , nepodstatné prvky v okolí objektu  $O(\Omega)$ , a nepodstatné vazby objektu  $\Omega$  na okolí,
  - **experiment o vlastnostech** – vylučují se nepodstatné vlastnosti objektu z hlediska řešeného problému  $P_R(\Omega)$ .

Nepodstatnost prvku nebo vazby je nutno objektivizovat s využitím reálného nebo počítačového experimentu (simulační modelování) a jejich výsledky statisticky zpracovat:

+ Jsou-li posuzované entity spojitými veličinami, pak se výsledky měření nebo výpočtů zpracovávají regresní analýzou. Entita je považována za nepodstatnou, jestliže konfidenční interval její střední hodnoty obsahuje nulu.

+ Jedná-li se o veličiny kvalitativní (logické), pak se pro zpracování využívá disperzní analýza, přičemž se testuje statistická hypotéza o nulovosti posuzované entity.

- Dalším krokem je výběr teorie  $\tau_\Omega$  pro výpočtové řešení problému  $PR(\Omega)$ . Teorii lze v zásadě vytvořit těmito přístupy:

- **Deduktivní přístup** – Intuitivně formuluje hypotéza, z níž se s využitím logiky odvodí teorie, přičemž její pravdivost je nutné ověřit experimentálně. Experiment realizovaný s cílem ověřit pravdivost teorie lze označit jako  **$\tau$ -verifikační experiment**. Tento experiment v mnoha případech předbíhá výpočtová modelování i o celá desetiletí, což může mít negativní důsledky na výsledek modelování. Může se totiž stát, že podmínky realizace dávno uskutečněného experimentu upadnou v zapomenutí, teorie se stále považuje za pravdivou, i když byla formulována na základě experimentu minulosti, který mohl mít nižší technickou a tím i rozlišovací úroveň než experimenty soudobé. Je proto nutné, aby teorie byly ověřovány průběžně s vývojem experimentu a tím byla neustále aktualizovaná oblast jejich praktické použitelnosti ve výpočtovém modelování.

- **Induktivní přístup** – V tomto přístupu má experiment funkci poznávací. Na základě experimentálně získaných poznatků se formulují axiomy teorie, takže lze hovořit o **formulačním experimentu**.

- **Formální přístup** – Při tvorbě teorie formálním přístupem se experiment nemusí uplatnit.

- Další uplatnění má experiment při zajišťování vstupních údajů do algoritmů výpočtového modelování pro problémy přímé i nepřímé. Pro počítačově orientované výpočtové modelování je charakteristické, že algoritmy a programy mají hromadný charakter. Vstupní údaje pro řešení konkrétního problému na konkrétním objektu se získávají experimentálně tzv. **konkretizačním experimentem**. Tento může být realizován bezprostředně před výpočtovým modelováním, resp. i ve značném časovém předstihu a jeho výsledky mohou být uloženy v příslušných databankách. V obou případech je ovšem žádoucí, aby úroveň výstupů z tohoto experimentu byla úrovně vyvážená s úrovní použité teorie a výpočtových algoritmů.

Existují případy, v nichž mezi vstupními údaji jsou veličiny, které nelze získat měřením, resp. měřením s následným přímým výpočtem; jsou to nepřímo určitelné veličiny, které lze získat využitím postupu označeného jako identifikace mechanických systémů, jehož součástí je tzv. **identifikační experiment**. Naměřené hodnoty veličin v tomto experimentu tvoří vstup do algoritmu nepřímé úlohy, jejíž výstupem jsou nepřímo určitelné veličiny.

- *Zcela obdobně jako v materiálním modelování, tak i ve výpočtovém modelování (VM) je nutné ověřit pravdivost získaného řešení, což se realizuje experimentálně. Příslušný experiment lze označit jako **VM-verifikační experiment**.*

## 2 Fotoelasticimetrie

Fotoelasticimetrie je experimentální metoda umožňující určit pole napjatosti v tělese nebo na jeho povrchu. Je založena na vlastnostech polarizovaného světla a na vlastnostech některých průhledných materiálů (sklo, celuloid, epoxydové pryskyřice ...), které při silovém, deformačním nebo teplotním zatížení se mění z opticky **izotropních** (světlo se šíří všemi směry stejnou rychlostí) na opticky **anizotropní** (v různých směrech se šíří světelný paprsek různou rychlostí). Fotoelasticimetrický jev můžeme aplikovat na rovinné, resp. prostorové modely zhotovené z opticky citlivých materiálů; hovoříme pak o **rovinné** a **prostorové fotoelasticimetrii**. Při tzv. **reflexní fotoelasticimetrii** se na povrch vyšetřované součásti přilepí tenká (1 až 3 mm) opticky citlivá folie.

Dříve, než si objasníme principy fotoelasticimetrie, zopakujme si význam pojmů, které budeme v dalším běžně používat.

**Světlo** je elektromagnetické vlnění vytvářené příčným kmitáním, šířící se přímkovitě po paprscích. Je charakterizováno světelným vektorem určujícím rovinu a amplitudu kmitání.

**Nepolarizované světlo** - má nahodilé směry kmitů; chování světla ve všech rovinách procházejících paprskem považujeme za rovnocenné.

**Polarizátor světla** je optické zařízení, které usměrní nepolarizované světlo tak, že propustí pouze složky kolmé na polarizační rovinu.

**Přímkově polarizované světlo** - světelný vektor kmitá v jedné rovině, tzv. rovině kmitů  $\rho$ , která je kolmá na polarizační rovinu T polarizátoru, Obr. 2.1.

**Čtvrtvlnová deska** je optické zařízení, které rozkládá vektor přímkově polarizovaného světla na dvě složky s fázovým posuvem  $\lambda/4$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka světla.

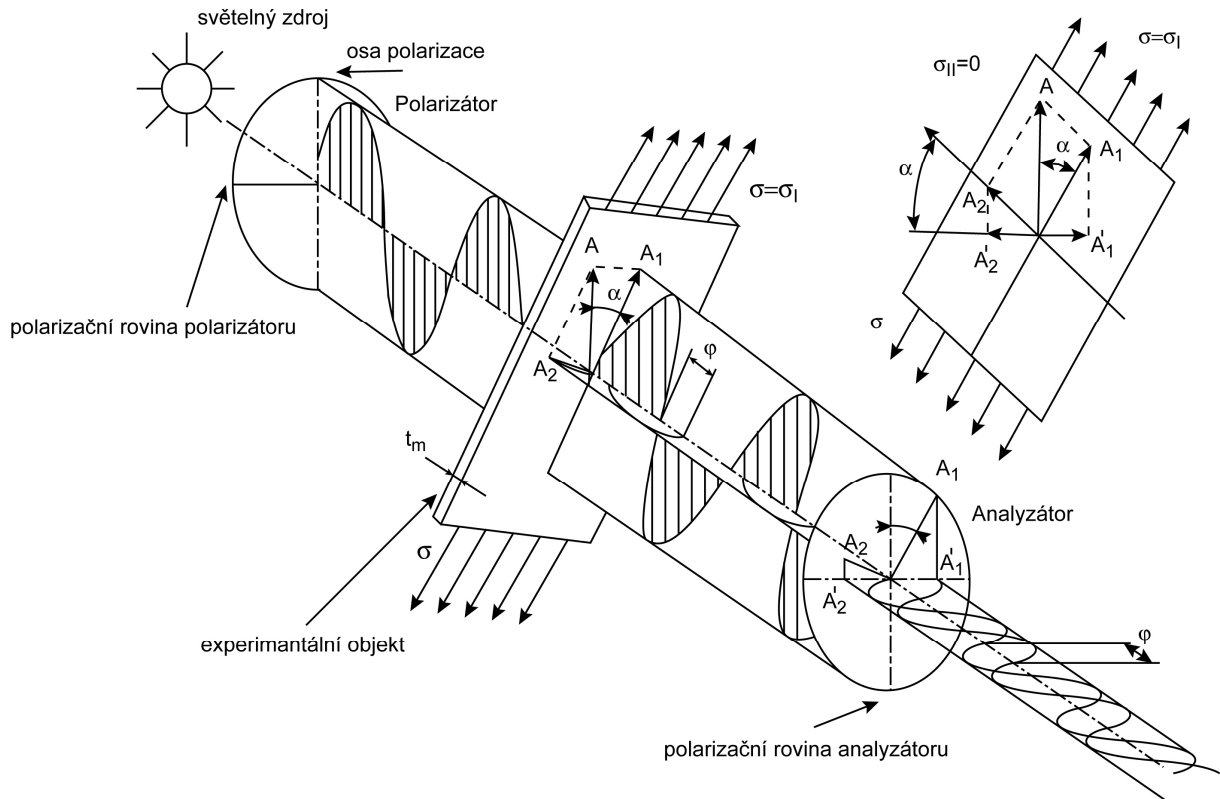
**Kruhově polarizované světlo** - koncový bod světelného vektoru vytváří šroubovici. Toto světlo lze získat složením dvou přímkově polarizovaných světél se stejnými amplitudami a s fázovým posuvem

### 2.1 Rovinná fotoelasticimetrie

Při rovinné fotoelasticimetrii vyšetřujeme optické jevy na rovinném experimentálním objektu  $E_0$  z opticky citlivého materiálu. Zařízení pro fotoelasticimetrické měření je tzv. polariskop buď s přímkovým uspořádáním (obsahuje polarizátory), nebo s kruhovým uspořádáním (obsahuje polarizátory s čtvrtvlnové desky). Přímkový polariskop má toto uspořádání: světelný zdroj S, polarizátor P, objekt EO, analyzátor A (je to polarizátor světla, jehož polarizační rovina je kolmá na polarizační rovinu P) viz. Obr. 2.1.

Světelný zdroj vysílá nepolarizované světlo, které se při průchodu polarizátorem mění na přímkově polarizované s určitým světelným vektorem  $\vec{OA}$ . Projde-li toto vlnění se sinusovým průběhem o vlnové délce  $\lambda$  zatíženým objektem EO, rozloží se v důsledku jeho anizotropních vlastností do dvou vzájemně kolmých rovin, které se shodují s hlavními rovinami, v nichž působí hlavní napětí  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$ , v příslušném bodě modelu. Svírá-li směr napětí  $\sigma_I$  s vektorem

paprsku  $\vec{OA}$  uhel  $\alpha$ , mají světelné vektory  $\vec{OA}_1, \vec{OA}_2$  vycházející ze zatíženého objektu EO velikost:



Obr. 2.1

$$\vec{OA}_1 = \vec{OA} \cos \alpha; \quad \vec{OA}_2 = \vec{OA} \sin \alpha \quad (2.1)$$

Jelikož v anizotropním materiálu se světelný paprsek šíří v různých směrech odlišnými rychlostmi, jsou světelné vektory  $\vec{OA}_1, \vec{OA}_2$  fázově posunuty o fázový rozdíl  $\varphi$ , který se určí z Wertheimova zákona:

$$\varphi = \frac{2\pi t}{\lambda} C_\sigma (\sigma_I - \sigma_{II}), \text{ resp. } \varphi = \frac{2\pi t}{K_\sigma} (\sigma_I - \sigma_{II}) \quad (2.2)$$

kde:  $t$  tloušťka měřeného EO [mm],  
 $C_\sigma$  fotoelasticimetrická konstanta [ $\text{mm}^2\text{N}^{-1}$ ],  
 $K_\sigma$  optická citlivost materiálu  $K_\sigma = \frac{\lambda}{C_\sigma}$  [ $\text{Nmm}^{-1}$ ]

s využitím vztahu pro **relativní dvojlom**

$$\Delta = C_\sigma t (\sigma_I - \sigma_{II}) \quad (2.3)$$

lze vztah (2.48) psát takto

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} \quad (2.4)$$

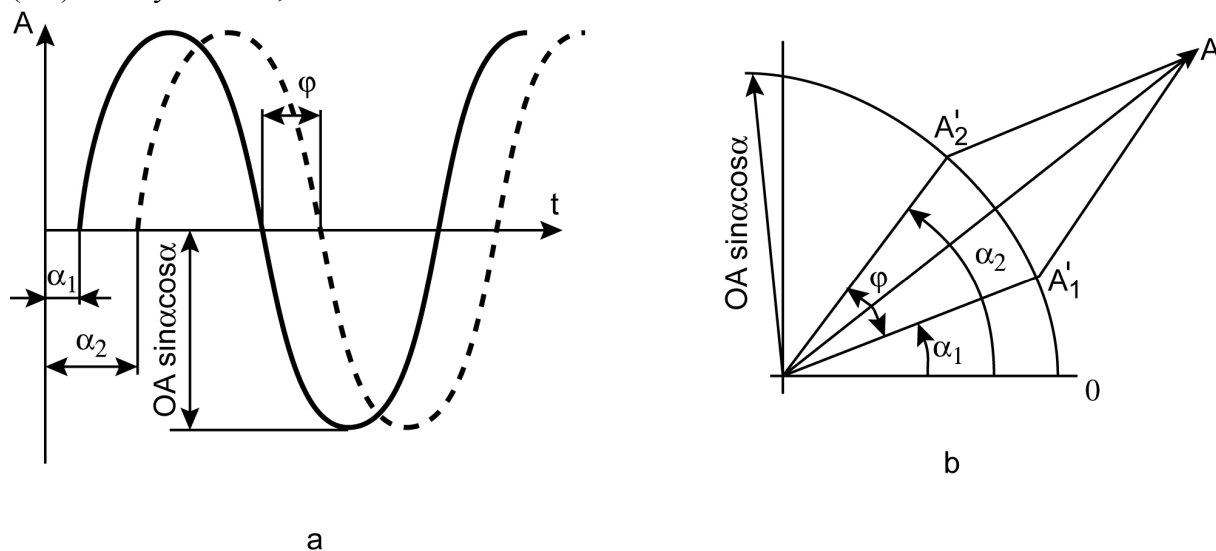
Vlnění charakterizované světelnými vektory  $\vec{OA}_1, \vec{OA}_2$  postupuje dále k analyzátoru, jehož polarizační rovina je kolmá na polarizační rovinu polarizátoru. Analyzátor propustí pouze



příměty složek světelných vektorů  $\vec{OA}_1$ ,  $\vec{OA}_2$  do roviny kolmé k polarizační rovině:

$$\begin{aligned}\vec{OA}'_1 &= \vec{OA}_1 \sin \alpha = \vec{OA} \cos \alpha \sin \alpha \\ \vec{OA}'_2 &= \vec{OA}_2 \sin \alpha = \vec{OA} \cos \alpha \sin \alpha\end{aligned}\quad (2.5)$$

Světelné vektory  $\vec{OA}'_1$ ,  $\vec{OA}'_2$  kmitají tedy ve stejné rovině, mají stejné amplitudy ( $\vec{OA} \cos \alpha \sin \alpha$ ), ovšem jsou stále fázově posunuty o fázový rozdíl  $\varphi$ , který je dle (2.2) úměrný zatížení, Obr. 2.2a.



Obr. 2.2

Využijeme-li pojem **intenzity světla** (energie, kterou propustí za jednotku času jednotková plocha), která je úměrná čtverci výsledné amplitudy světelného vektoru  $\vec{OA}_v$  (Obr. 2.2) dostaneme :

$$\begin{aligned}I &\approx \left( \vec{OA}_v \right)^2 = \left( \vec{AO}'_1 \right)^2 + \left( \vec{AO}'_2 \right)^2 - 2 \vec{OA}'_1 \vec{OA}'_2 \cos \varphi = \\ &= \left( \vec{OA} \right)^2 2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha (1 - \cos \varphi)\end{aligned}\quad (2.6)$$

Předpokládejme, že intenzita světla před průchodem polarizátoru je  $I = \vec{OA}_v = I$ , pak vztah (2.6) lze upravit do tvaru:

$$I = \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\varphi}{2}\quad (2.7)$$

Výsledná intenzita je součinem dvou různých členů. První člen souvisí s úhlem natočení polarizátoru vůči hlavním směrům napjatosti (úhel  $\alpha$ ), druhý člen je funkcí fázového posunu  $\varphi$ , který je zase závislý na vlnové délce světla (viz vztah (2.4)).

Prosvěćujeme-li objekt EO monochromatickým světlem, pak za analyzátořem můžeme

pozorovat řadu tmavých bodů a čar. Při prosvícení bílým světlem pak tmavé body, tmavé a barevné čáry.

Hledejme podmínky pro vznik **tmavých míst**, která odpovídají nulové intenzitě světla. Vztah

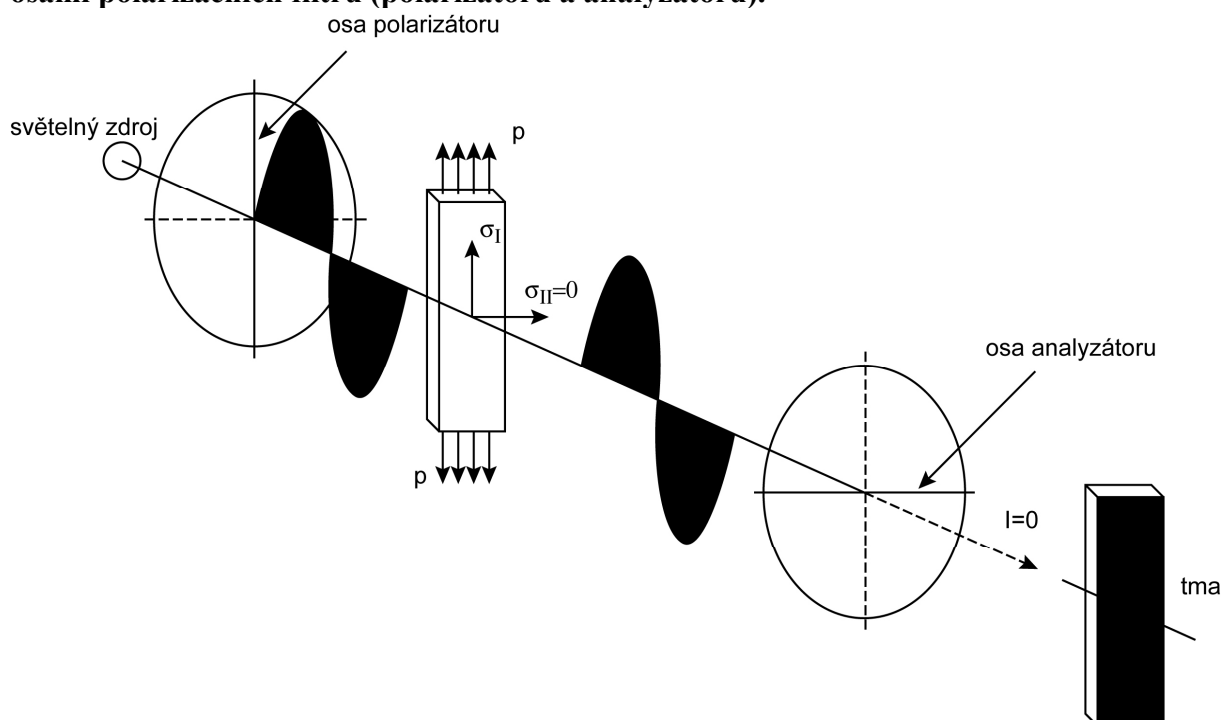
(2.7) bude pro  $I = 0$  splněn, když:  $\sin^2 2\alpha = 0$ , resp.  $\sin^2 \frac{\varphi}{2} = 0$ .

$$a) \quad \sin^2 2\alpha = 0 \Rightarrow \alpha = n \frac{\pi}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.8)$$

Jelikož  $\alpha$  je úhel, který svírá směr jednoho hlavního napětí s osou polarizátoru, podmínka (2.8) vyjadřuje, že směr jednoho z hlavních napětí svírá s osou polarizátoru úhel  $\alpha = 0$  resp. celý  $n$ -tý násobek úhlu  $\pi/2$ . Protože obě hlavní napětí jsou vzájemně kolmé, splňuje vztah (2.8) i druhé hlavní napětí. Vztah (2.8) tedy vyjadřuje podmínku pro geometrická místa bodů, v nichž vzájemně kolmé **směry hlavních napětí jsou totožné se směry vzájemně kolmých os polarizátoru a analyzátoru**, Obr. 2.3.

Poloha tmavých čar splňujících podmínku (2.8), tzv. **izoklin**, je tedy určena pouze polohou os polarizátoru a analyzátoru vzhledem objektu EO a je nezávislá na  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$ , tedy na zatížení. Při synchronním otáčení polarizátoru a analyzátoru se poloha izoklin mění. Lze tedy konstatovat:

**Izokliny jsou geometrickým místem bodů, v nichž hlavní směry napětí jsou rovnoběžné s osami polarizačních filtrů (polarizátoru a analyzátoru).**



Obr. 2.3

$$b) \quad \sin^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right) = 0 \Rightarrow \varphi = 2m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.9)$$

Dosadíme-li z podmínky (2.2) za  $\varphi$  do vztahu (2.9), dostaneme:

$$m = \frac{C_\sigma}{\lambda} t (\sigma_I - \sigma_{II}) \quad (2.10)$$

$$m = \frac{t}{K_\sigma} (\sigma_I - \sigma_{II}) \quad (2.11)$$

Optický efekt dvojlomu lze v oblasti platnosti Hookova zákona vztahovat i k hlavním poměrným přetvořením  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_{II}$ . Vztah (2.11) lze s využitím konstitutivních vztahů pro rovinnou napjatost převést na tvar:

$$m = \frac{t}{K_\varepsilon} (\varepsilon_I - \varepsilon_{II}) \quad (2.12)$$

$$\text{kde } K_\varepsilon = \frac{1 + \mu}{E} K_\sigma \quad (2.13)$$

S použitím vztahů (2.4) a (2.9) lze psát:

$$\Delta = m\lambda \quad (2.14)$$

Podmínka (2.10) vyplývající z podmínky (2.9) bude splněna :

$$\text{b1) pro: } m = 0, \text{ když } \sigma_I - \sigma_{II} = 0 \quad (2.15)$$

V tomto případě, **nezávisle na druhu světla**, charakterizovaného vlnovou délkou  $\lambda$ , bude v bodech splňujících podmínku (2.15) intenzita světla nulová. V těchto bodech nastává tzv. úplné zatemnění a při pozorování se jeví jako černé body. Jsou to místa, tzv. **singularit**, z nichž je  $\sigma_I - \sigma_{II}$ . Mohou vytvářet buď izolované body (**singulární body**) nebo křivky (**singulární křivky**). Jejich poloha je nezávislá:

- na druhu světla (zůstávají nezměněny při prosvětlování bílým i monochromatickým světlem),
- na poloze natočení analyzátoru nebo polarizátoru.

$$\text{b2) pro: } m \neq 0, \text{ když } \sigma_I - \sigma_{II} = \text{konst.} \neq 0$$

a) Jestliže prosvěćujeme objekt E0 monochromatickým světlem s vlnovou délkou  $\lambda_M$ , pak černá barva ( $I = 0$ ) bude v místech, u nichž rozdíl hlavních napětí splňuje vztah (získáme ho ze vztahu (2.10)):

$$(\sigma_I - \sigma_{II})_M = m \frac{\lambda_M}{ct} \quad (2.16)$$

(Nejčastěji se používá monochromatické žlutozelené světlo s délkou  $\lambda_M = 556.10^{-9} \text{ m}$ .)

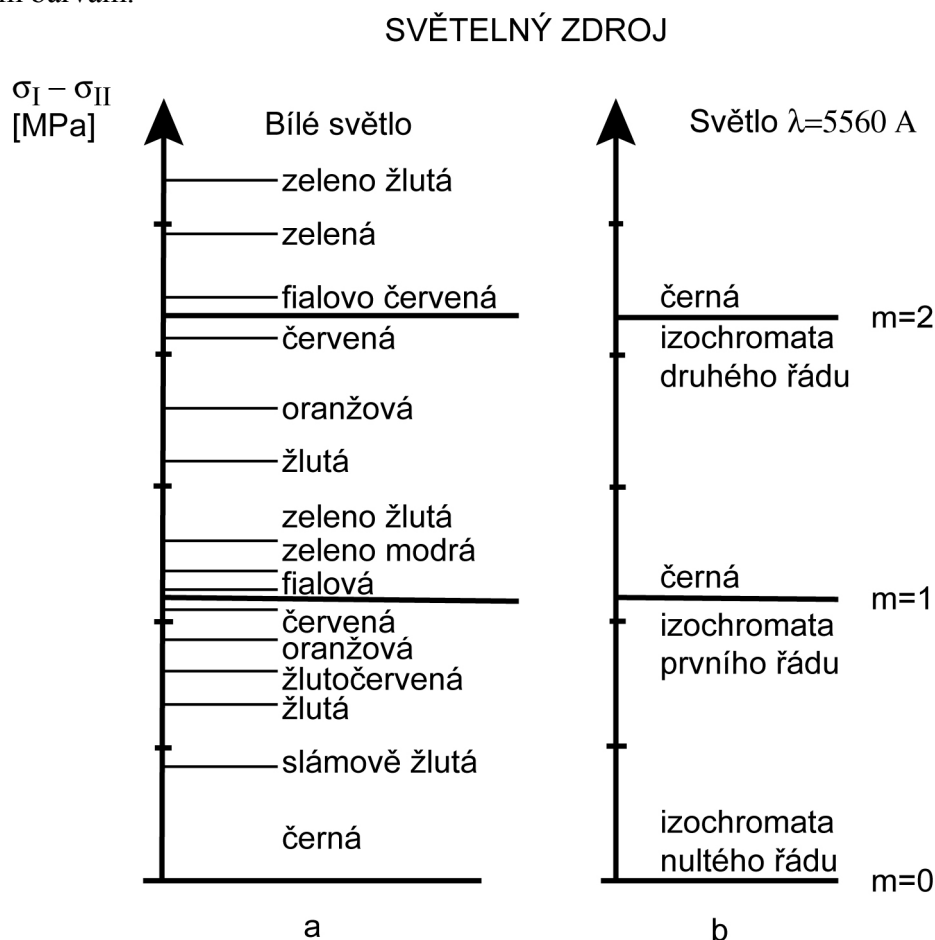
b) Jestliže použijeme bílé světlo, pak se na stínítku objeví soustava barevných pruhů, s charakteristickým sledem barev duhy, jako důsledek tzv. **relativního zatemnění**. Při tomto zatemnění dochází ke zrušení té barvy světla, jejíž vlnová délka  $\lambda_r$  pro příslušný rozdíl  $(\sigma_I - \sigma_{II})$  vyhovuje vztahu (2.16). Toto místo je pak zbarveno komplementárně, tj. doplňkovou barvou k barvě s vlnovou délkou  $\lambda_r$ . Jestliže bude  $(\sigma_I - \sigma_{II})$  takové, že  $\lambda_r = 556.10^{-9} \text{ m}$  (žlutozelená barva), pak komplementární barva bude barva na rozhraní fialovomodré a červené.

Barevné pruhy se ve fotoelasticimetrii označují jako **izochromaty** s tímto vymezením :

**Izochromaty** jsou geometrická místa bodů

- se stejným barevným odstínem (vizuální interpretace), jako důsledek
- konstantní velikosti dvojlomu (optická interpretace) a dle (2.10)
- s konstantním rozdílem hlavních napětí (interpretace mechaniky).

Na Obr. 2.4 je vynesena rozdíl napětí a jemu odpovídající barevná pruhy u celuloidového vzorku s citlivostí  $k = 43 \text{ Nmm}^{-1}$ . Při osvětlení bílým světlem je sled barev nezávislý na druhu opticky citlivého materiálu, odlišné jsou pouze rozdíly  $\sigma_I - \sigma_{II}$  odpovídající jednotlivým barvám.



Obr. 2.4

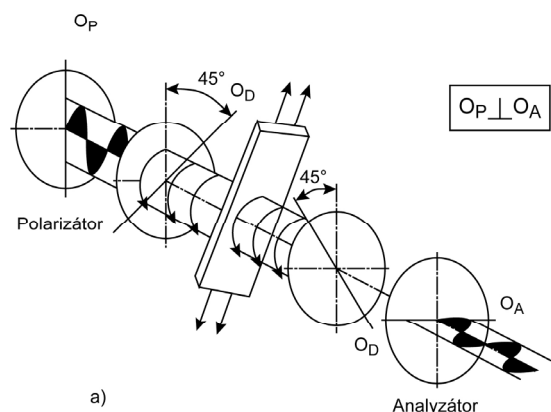
Při použití monochromatického světla se v místech celých řádů izochromat objeví černé pruhy, které se při synchronním natáčení polarizátoru a analyzátoru nepohybují. Ze vztahu (2.10) je zřejmé, že velikost rozdílu napětí  $\sigma_I - \sigma_{II}$  lze určit z naměřeného řádu izochromaty.

Kromě uvedené přímkové polarizace se často používá i tzv. **polarizace kruhová**. V tomto případě se mezi polarizátor a objekt EO a mezi EO a analyzátor vloží čtvrtvlnové desky, jejichž optické osy  $O_P$  svírají s optickými osami polarizátoru ( $O_P$ ) a analyzátor ( $O_A$ ) úhel  $45^\circ$ .

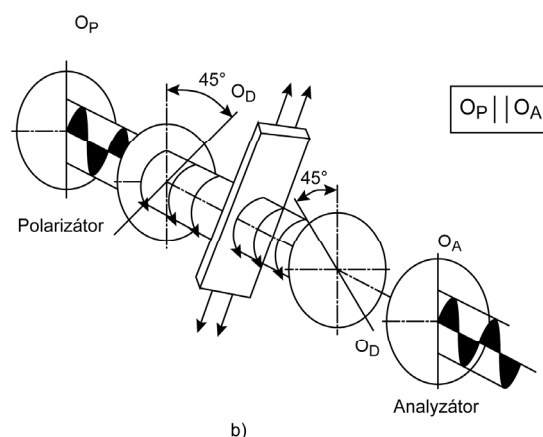
Podle vzájemné polohy optických os polarizátoru a analyzátoru rozeznáváme :

- základní kruhovou polarizaci (osy  $O_P$ ,  $O_A$  jsou vzájemně kolmé, Obr. 2.5a)
- doplňkovou (komplementární) kruhovou polarizaci (osy  $O_P$  a  $O_A$  jsou rovnoběžné, Obr. 2.5b)

## Základní kruhová polarizace



## Komplementární kruhová polarizace



Obr. 2.5

Při obou typech kruhové polarizace neexistuje preferovaný směr světelného paprsku (u přímkové polarizace byl dán rovinou kmitů polarizovaného světla), takže není vazba mezi úhlem natočení objektu EO a polarizačními osami  $O_P$ ,  $O_A$ . Výsledná intenzita světla po průchodu kruhovým polariskopem je :

U základní polarizace:

$$I = \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

Úplné zatemnění ( $I = 0$ ) nastane:

pro  $\varphi = 2m\pi; m \in (0, 1, 2, \dots)$

takže:  $\Delta = m\lambda$

U komplementární polarizace:

$$I = 1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2} = \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

Úplné zatemnění ( $I = 0$ ) nastane:

pro  $\varphi = (2m + 1)\pi; m \in (0, 1, 2, \dots)$

takže:  $\Delta = (m + 0,5)\lambda$

Pro kruhovou polarizaci lze souhrnně konstatovat :

- nelze vyšetřovat izokliny, protože se neobjeví ,
- v základní kruhové polarizaci se objeví singulární body ( $m = 0 \rightarrow \Delta = 0$ ) a izochromaty celých řádů ( $m = 1, 2, \dots$ ),
- v komplementární kruhové polarizaci se objeví izochromaty polovičních řádů ( $m = 1/2, 3/2, \dots$ ).

### 2.1.1 Postup při vyšetřování izoklin a izochromat

a) Při vyšetřování izoklin postupujeme takto

Osu polarizátoru dáme do svislé a osu analyzátoru do vodorovné polohy. Izokliny získané při této základní poloze filtrů jsou izokliny parametru  $0^\circ$ . Pak synchronně otáčíme polarizátorem a analyzátozem po určitých krocích (obvykle po  $\Delta\alpha = 10^\circ, \text{resp. } 15^\circ$ ) a zakreslujeeme izokliny těchto dalších parametrů. Na Obr. 2.6b jsou zakresleny izokliny pro část stlačovaného kroužku dle Obr. 2.6a. Při sestrojování obrazu izoklin využíváme tyto jejich vlastnosti:

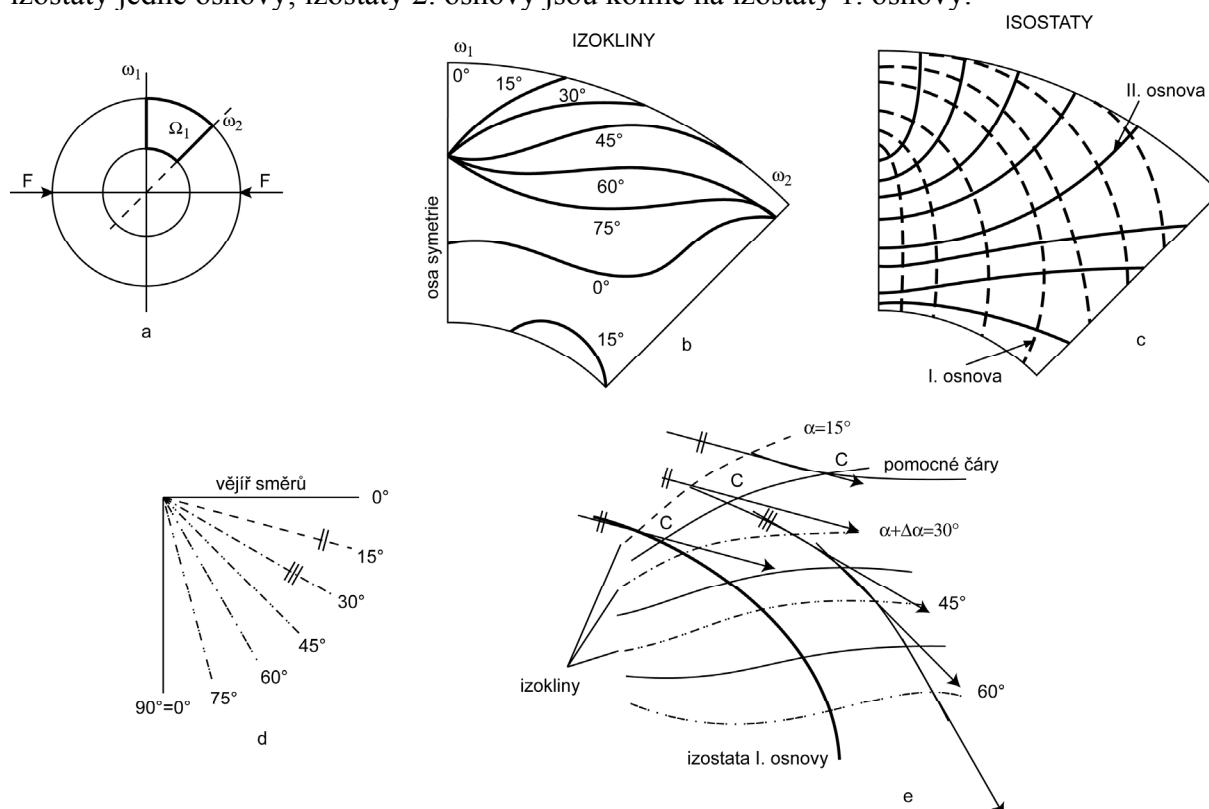
- 1) nezatížený okraj stejně jako osa souměrnosti je jednou izoklinou,
- 2) izokliny se protínají pouze v singulárních bodech a v místech působí osamělých sil.

Pomocí izoklin lze sestrojít křivky tzv. **isostaty** (Obr. 2.6c). Tečny k isostatám udávají směry

hlavních napětí, tedy

**Isostaty jsou křivky, u nichž tečna v daném bodě určuje směr hlavního napětí v tomto bodě.**

Isostaty sestavujeme nejčastěji graficky (Obr. 2.6e). Na izoklinu parametru  $\alpha$  nanese se soustavu rovnoběžek stejného parametru. Body, v nichž rovnoběžky parametru  $\alpha$  protínají pomocnou čáru (tato půli vzdálenost mezi sousedními izoklinami), vedeme další soustavu rovnoběžek parametru  $\alpha + \Delta\alpha$ . Křivky zakreslené do získané polygonální osnovy jsou izostaty jedné osnovy; izostaty 2. osnovy jsou kolmé na izostaty 1. osnovy.



Obr. 2.6

### b) Měření rozdílu hlavních napětí

Rozdíl hlavních napětí lze v zásadě určovat z obrazu izochromat a kompenzačními metodami.

1) Z druhého vztahu (2.10) je zřejmé, že známe-li optickou citlivost materiálu  $K_\sigma$ , tloušťku  $t$  objektu EO, můžeme rozdíl napětí  $\sigma_I - \sigma_{II}$  určit ze vztahu:

$$\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{m}{t} K_\sigma \quad (2.17)$$

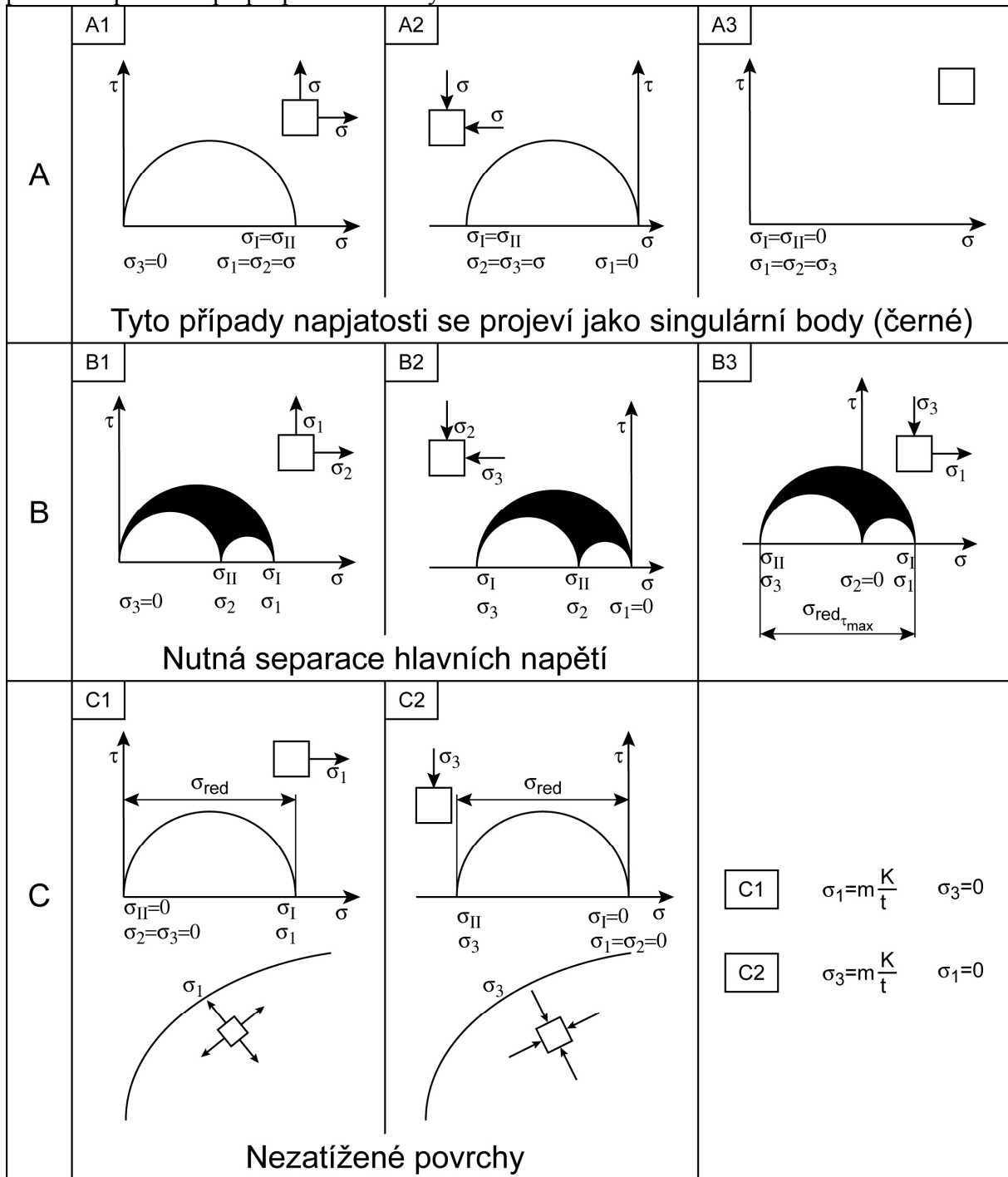
jestliže se nám podaří určit řád izochromaty  $m$ . Z předchozího textu vyplývá, že celý řád  $m = 1, 2, 3, \dots$  lze určit základní kruhovou polarizací, poloviční řády  $m = 0.5, 1.5, \dots$  pak komplementární kruhovou polarizací.

2) Jednou z kompenzačních metod je tzv. **goniometrická kompenzace**, využívající polariskop pro kruhovou polarizaci a sestávající z těchto kroků:

- určení směru hlavních napětí na celém povrchu EO objektu,
- zakreslení izochromat celých a polovičních řádu v kruhově polarizovaném světle,
- goniometrické měření. Ve vyšetřovaném bodě natočíme polarizátorem a analyzátozem

tak, aby jejich osy  $O_P$ ,  $O_A$  byly rovnoběžné se směry hlavních napětí. Analyzátořem pak natáčíme tak, aby vyšetřovaný bod ztemněl. Úhel natočení měříme na kruhové stupnici rozdělené na 200 dílků. Každému dílku odpovídá hodnota dvojlomu  $\Delta = 0,01$ .

3) Rozdíl hlavních napětí lze orientačně určovat srovnáváním barevného odstínu ve vyšetřovaném bodě objektu EO s etalonem, u něhož známe rozdělení napětí. Srovnávání se provádí v polariskopu při prosvícení bílým světlem.



Obr. 2.7

c) Určování hlavních napětí

V předcházejících odstavcích jsme ukázali jak se opticko-grafickou cestou zjišťují z obrazu izoklin směry hlavních napětí, charakterizované izostatami a jak se optickou cestou měří

relativní dvojlom (izochromaty) z něhož lze na základě Werthaimova zákona (2.2), (2.17) určit rozdíl napětí  $\sigma_I - \sigma_{II}$ . U rovinné fotoelasticimetrie vzniká v modelovém objektu EO rovinná napjatost, (jedno hlavní napětí je nulové), takže mohou nastat případy dle Obr. 2.7.

Případy A se projeví ve fotoelasticimetrii jako singulární body (tmavé body). Někdy se mohou určit z geometrie objektu EO a z charakteru zatížení - budou ve volných rozích.

Případy C se vyskytují na nezatížených okrajích objektů EO. Podél nezatíženého obvodu EO je tedy známo další nulové napětí a jediné nenulové napětí (má směr tečny k obrysu EO) se

určí ze vztahu  $\sigma = m \frac{K}{t}$ . Velikost relativního dvojlomu na volném okraji udává tedy v určitém měřítku přímo hodnotu obvodového napětí.

Jestliže je  $\sigma_I \neq 0, \sigma_{II} = 0$ , ale z charakteru zatížení lze usuzovat, že  $\sigma_I > 0, \sigma_{II} < 0$  - případ B3 pak rozdíl hlavních napětí  $\sigma_I - \sigma_{II}$  se přímo rovná redukovanému napětí podle podmínky plasticity  $\max \tau$ . V případech B1, B2, chceme-li posuzovat mezní stavy napjatosti, je nutné stanovit velikosti jednotlivých napětí  $\sigma_I, \sigma_{II}$ . V podstatě existují dva různé přístupy k určení  $\sigma_I, \sigma_{II}$ :

I. Metody, který využívají k určení  $\sigma_I, \sigma_{II}$  další doplňovací měření. Do této skupiny patří metody u nichž se doplňovacím měřením určuje součet hlavních napětí  $\sigma_I + \sigma_{II}$ . Z těchto metod uvádíme:

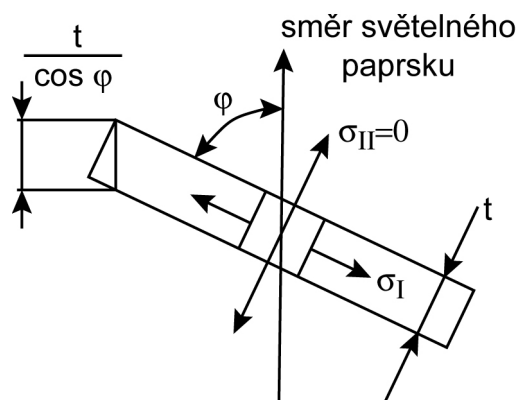
a) **Mesnagerova metoda** - v bodě v němž určujeme  $\sigma_I, \sigma_{II}$  změříme změnu tloušťky  $t$  zatíženého objektu EO. Ze zobecněného Hookeova zákona pro  $\sigma_{III} = 0$  je:

$$\varepsilon_{III} = \frac{1}{E} [-\mu(\sigma_I + \sigma_{II})], \quad \varepsilon_{III} = \frac{\Delta t}{t} \Rightarrow \Delta t = -\frac{\mu t}{E} (\sigma_I + \sigma_{II})$$

Změna tloušťky se měří tzv. latometry. Hlavní napětí se pak určí řešením této soustavy rovnic:

$$\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{mK_\sigma}{t}, \quad \sigma_I + \sigma_{II} = \frac{E\Delta t}{\mu t} \Rightarrow \sigma_{I,II} = \frac{1}{2t} \left( \frac{E}{\mu} \Delta t \pm mK_\sigma \right)$$

b) **Tesařova metoda** - hlavní napětí se určují z izochromat a z izopach (geometrická místa bodu s konstantním součtem hlavních napětí). **Izopachy** vznikají při interferenci světla ve vzduchové vrstvě mezi zatíženým objektem EO a planparalelní deskou.



Obr. 2.8



c) **metoda šikmého prosvícení**; Vychází ze vztahu:  $\sigma_I - \sigma_{II} \cos^2 \varphi = m_\varphi K \frac{\cos \varphi}{t_m}$  kde  $m_\varphi$  je řád izochromaty při šikmém prosvícení. Z kolmého a šikmého prosvícení pak můžeme určit  $\sigma_I, \sigma_{II}$ , a to ze vztahů:

$$\sigma_I = \frac{K_\sigma}{t} \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi} (m_\varphi - m \cos \varphi)$$

$$\sigma_{II} = \frac{K_\sigma}{t} \frac{1}{\sin^2 \varphi} (m_\varphi \cos \varphi - m)$$

d) Mezi tzv. přímé metody měření napětí patří **Tesařova metoda navrtání** - v místě EO v němž určujeme napětí, vyvrtáme kolmo k rovině EO malý otvor ( $\phi$  2 až 4 mm). Tím získáme volný nezátížený obvod, na němž fotoelasticimetricky zjistíme hlavní napětí  $\sigma_{I\sigma}, \sigma_{II\sigma}$  ve směrech rovnoběžných se  $\sigma_I, \sigma_{II}$  (izostaty známe), Obr. 2.9. Dokazuje se, že mezi uvedenými napětími platí vztah :

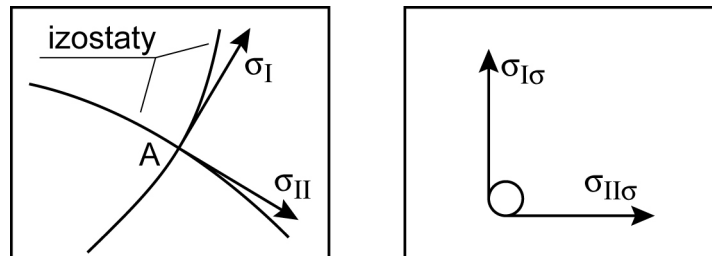
$$\sigma_I = \frac{1}{8} (3\sigma_{I\sigma} + \sigma_{II\sigma})$$

$$\sigma_{II} = \frac{1}{8} (3\sigma_{II\sigma} + \sigma_{I\sigma})$$

Pro kontrolu lze použít vztah:

$$(\sigma_{I\sigma} - \sigma_{II\sigma}) = \frac{1}{4} (\sigma_I - \sigma_{II})$$

Metoda určení  $\sigma_I, \sigma_{II}$  je zatížena chybou cca 2 až 5%.



Obr. 2.9

II. Skupina metod - tzv. **separační metody**, které s využitím základních fotoelasticimetrických měření řeší graficky nebo početně (dnes s využitím počítačů) diferenciální rovnice rovnováhy v izostatických, polárních nebo kartézských souřadnicích. Patří sem :

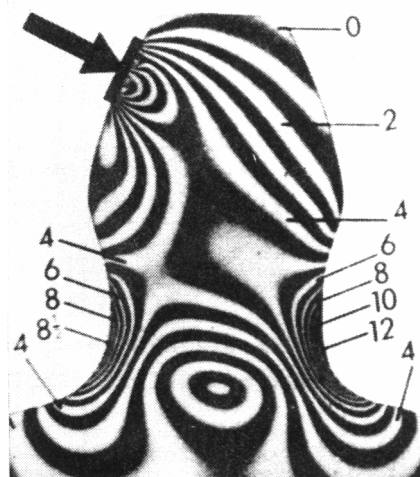
a) **Maxwellova početní metoda** - jednotlivá napětí se řeší z Lamé – Maxwellových rovnic

$$\frac{\delta \sigma_I}{\delta S_1} = \frac{\sigma_{II} - \sigma_I}{r_2}$$

$$\frac{\delta \sigma_{II}}{\delta S_2} = \frac{\sigma_I - \sigma_{II}}{r_1}$$

kde

$\delta S_1, \delta S_2$  jsou obloukové prvky izostatických křivek, podél nichž působí napětí  $\sigma_I, \sigma_{II}$  a  $r_1, r_2$  jsou odpovídající poloměry křivosti těchto prvků.

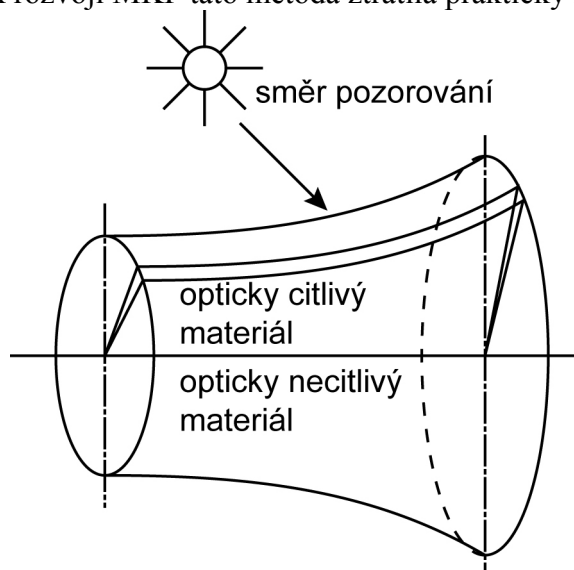


Obr. 2.10

## 2.2 Prostorová fotoelasticimetrie

Fotoelasticimetrii lze aplikovat i na prostorové úlohy. V současné době lze použít tyto tři hlavní způsoby řešení :

a) **metoda slepovaných modelů** - její použití je omezeno na řešení rotačně souměrných úloh, u nichž radiální a obvodová napětí jsou hlavními. Do objektu EO z opticky necitlivého materiálu se do meridiánového řezu vlepí tenká destička z opticky citlivého materiálu a fotoelasticimetricky se vyšetřuje určení izoklin a izochromat ve směru kolmém na destičku (Obr. 2.11). Vzhledem k rozvoji MKP tato metoda ztratila prakticky na významu.

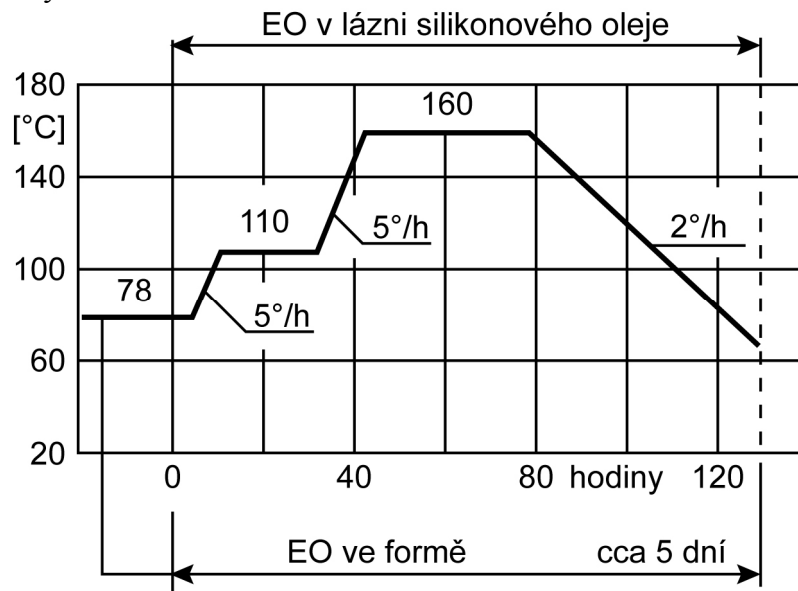


Obr. 2.11

b) **zmrazovací metoda** - spočívá ve schopnosti některých materiálů zafixovat dvojlom, který nastane při zatížení opticky citlivého materiálu zahřátého na tzv. zmrazovací teplotu (pro materiál Epoxy Chs 110 je to cca 120°C). Fyzikální podstata spočívá v tom, že u materiálů s dvojfázovou strukturou se jednotlivé fáze chovají při zvýšené teplotě odlišně. Při zahřívání se jedna fáze stává plastickou až kapalnou při nižších teplotách než druhá fáze. Zatížení při zahřívání na zmrazovací teplotu pak přenáší pružně se chovající fáze. Po ochlazení kapalná fáze ztuhne a tím nedovolí po odlehčení modelu, aby se pružně chovající fáze vrátila do původního stavu. V modelu tedy zůstane trvale zafixována napětí od zatížení. Vyhodnocování napětí v prostorovém modelu provádíme postupy rovinné fotoelasticimetrie na tenkých destičkách

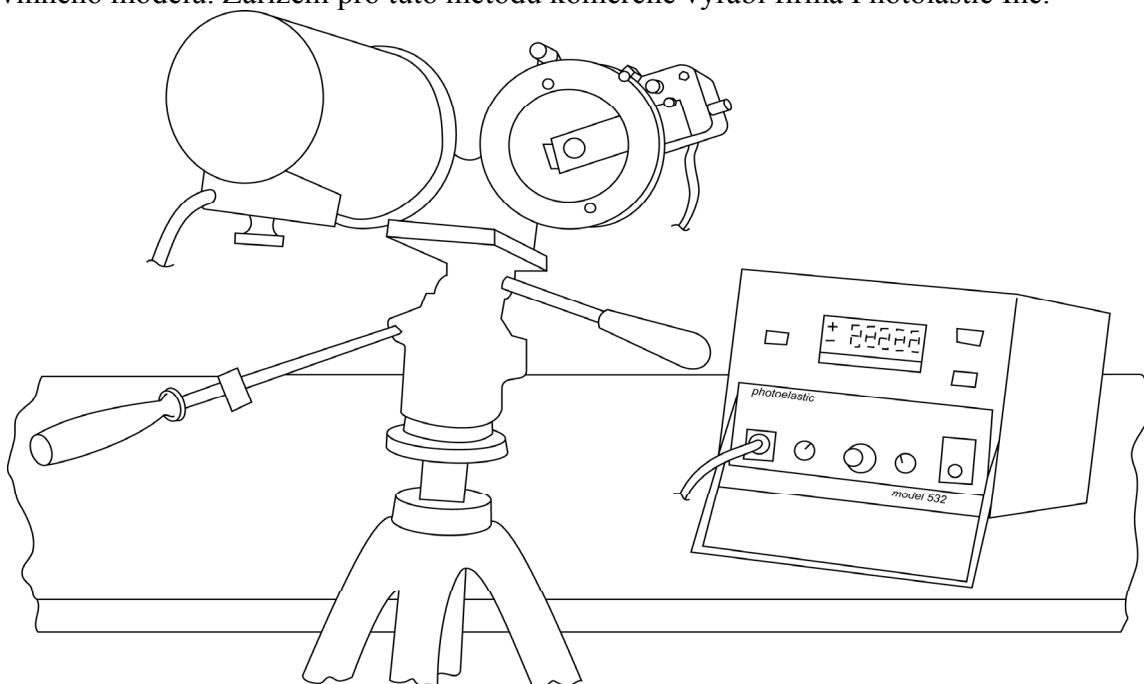
vyřezaných z modelu. Při výrobě a zatížení EO se při použití pryskyřice Chs 110 prakticky postupuje takto. Pryskyřice se odlévá do formy EO ve stavu částečně zpolymerizovaném. Když se EO dostane do gelového stavu, vyjme se z formy a vytvrzování se provádí v silikonové lázni do níž je EO ponořen. Představu o teplotách a časech potřebných k výrobě EO poskytuje Obr. 2.12.

Zatěžování EO se provádí v peci při teplotě cca 120°C. EO se ochlazuje na normální teplotu pod zatížením. Metoda patří i dnes mezi nejpoužívanější. Mohou ji provádět laboratoře s velkými praktickými zkušenostmi.



Obr. 2.12

c) **metoda rozptýleného světla** - průhledný zatížený model je ponořen do kapaliny se stejným indexem lomu, jaký má materiál modelu a osvětlován „světelným“ řezem (přes štěrbinu nebo laserovým paprskem bario-neonovým). Světelný řez odpovídá vyříznutí tenké destičky z modelu u zařazovací metody. V tomto řezu dochází pak ke stejným jevům jako u rovinného modelu. Zařízení pro tuto metodu komerčně vyrábí firma Photolastic Inc.



Obr. 2.13

### 2.3 Reflexní fotoelasticimetrie

U této metody na povrch skutečné součásti nebo součásti zhotovené z modelového materiálu (materiál s menším modulem pružnosti, aby se zvětšily deformace) přilepíme opticky citlivou vrstvu. U rovinných ploch je možno lepit komerčně vyráběné ploché folie, u zakřivených ploch se tenké folie odlévají z kapalných složek. Zatížíme-li součást, pak deformace se přenáší i do folie, v níž vznikají stejné fotoelasticimetrické efekty jako u rovinného modelu. Osvětlování a pozorování součásti se provádí ze stejné strany přes speciální přenosný polariskop (Obr. 2.13). Světelný paprsek se odráží od vrstvy reflexního tmelu, který je současně i lepidlem (odtud i název metody). Měřením získáme opět izokliny určující směry hlavních poměrných přetvoření  $\sigma_I, \sigma_{II}$  a izochromaty určující rozdíly hlavních přetvoření v reflexní vrstvě:

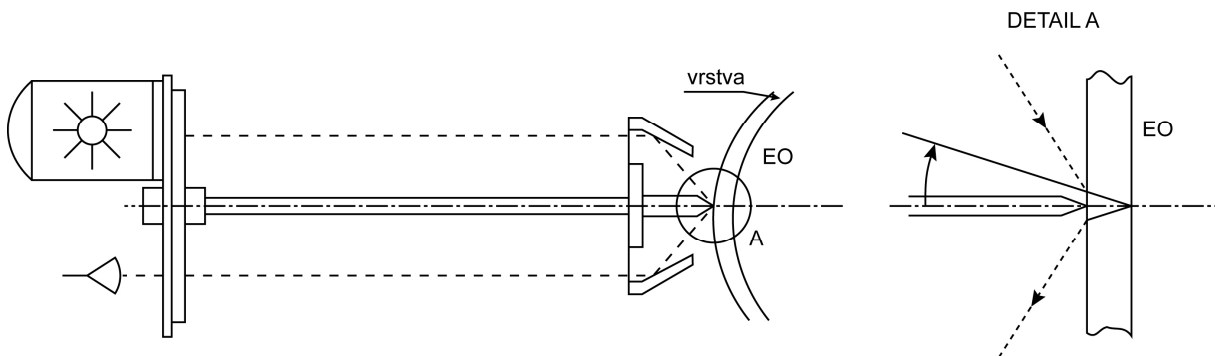
$$(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_v = \frac{K_\varepsilon}{2t} m \quad (2.18)$$

Dále platí:

$$K_\varepsilon = \frac{\lambda}{C_\varepsilon} \quad (2.19)$$

Řád izochromaty  $m$  se nejčastěji provádí tzv. **Tardyho kompenzací**. Doplnkový údaj pro určení přetvoření  $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$  se získá šikmým prosvětlením pro který firma Photolastic Inc. vyrábí speciální zařízení (Obr. 2.14). Jestliže řády izochromaty ve vyšetřovaném bodě při kolmém nasvětlení označíme  $m_K$  a při šikmém  $m_S$ , pak  $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$  se vypočtou ze vztahů:

$$\begin{aligned} \varepsilon_I &= \frac{K_\varepsilon}{2t} (1,5m_S - m_K) \\ \varepsilon_{II} &= \frac{K_\varepsilon}{2t} (1,5m_S - 2m_K) \end{aligned} \quad (2.20)$$



Obr. 2.14

Napětí  $\sigma_I, \sigma_{II}$  se určí z konstitutivních vztahů pro rovinnou napjatost. Komerčně vyráběné přístroje obsahují kompenzátory vázané přímo s digitálním čtecím zařízením, na němž se v číslicové formě zobrazuje odečítaná velikost napětí, směry hlavních napětí a číslo měřícího místa. Je taktéž možné napojení zařízení na tiskárnu.

Firma Photolastic dodává se zařízením i fotoelasticimetrické materiály. Materiály s označením PS jsou dodávány ve formě desek, materiály PL se odlévají ze dvou kapalných komponent. Pro srovnání vlastností materiálů jsou v Tab. 2.1 uvedeny i materiály pro rovinnou fotoelasticimetrii.

Při fotoelasticimetrických měřeních je nutné mít představu o citlivosti rovinné a reflexní fotoelasticimetrie, vyjádřené např. potřebným rozdílem  $(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})$  na vytvoření jednoho řádu izochromaty. Z předcházejících rozborů víme, že pro fotoelasticimetrii :

rovinnou (r) platí:

$$(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_r = \frac{mK_{\varepsilon,r}}{t_r}$$

reflexní (re) platí:

$$(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_{re} = \frac{mK_{\varepsilon,re}}{2t_{re}}$$

takže poměr je:

$$\frac{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_r}{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_{re}} = 2 \frac{t_{re}}{t_r} \frac{K_{\varepsilon,r}}{K_{\varepsilon,re}} \quad (2.21)$$

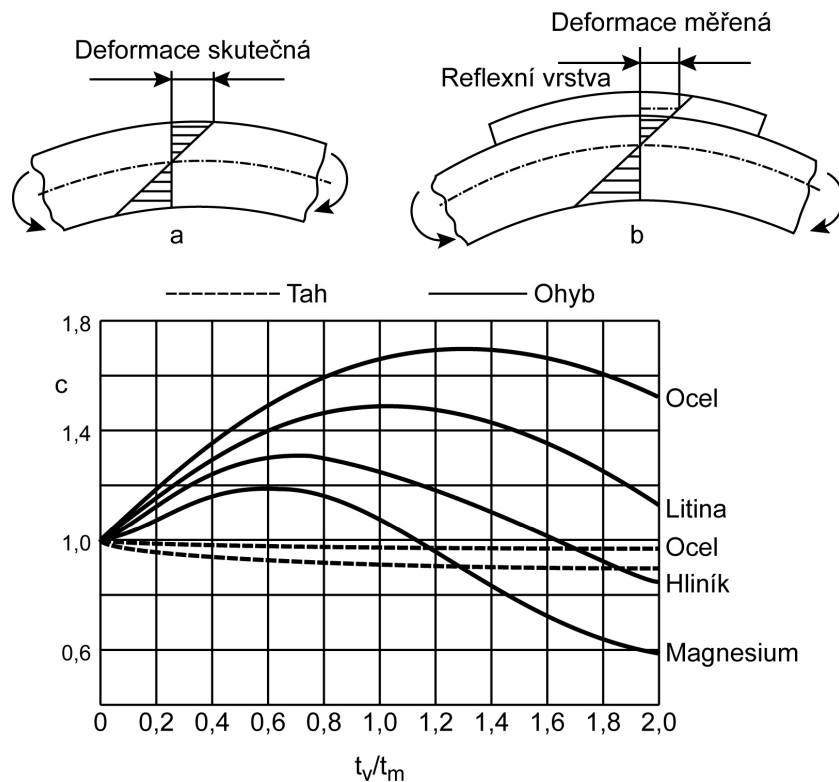
Budeme-li uvažovat stejné tloušťky EO ( $t_r - t_{re}$ ) a srovnáme-li nejcitlivější materiál PS-1 pro reflexní metodu s nejčastěji používaným materiálem PSM-5 pro rovinnou metodu,

dostaneme:  $\frac{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_r}{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_{re}} \doteq 5,9$ . Lze tedy konstatovat, že reflexní fotoelasticimetrie je

podstatně méně citlivá než rovinná. Jestliže pro měření použijeme např. materiál PS-1 o největší dodávané tloušťce  $t = 3,05\text{mm}$ , pak na vytvoření jednoho řádu izochromaty je potřebný rozdíl přetvoření  $(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_{re} \doteq 630\mu\text{m}/\text{m}$ , čemuž při aplikaci na ocel odpovídá

rozdíl hlavních napětí:  $\sigma_I - \sigma_{II} = \frac{E}{1 + \mu}(\varepsilon_I - \varepsilon_{II}) \doteq 102\text{MPa}$ .

Ze vztahu (2.19) lze usuzovat i na dosažitelnou přesnost. Jestliže prakticky dosažitelná rozlišitelnost řádu izochromaty je  $\Delta m = 0,01$ , pak pro materiál PS-1 o tloušťce 3,05 mm dostaneme:  $\Delta(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_{re} = 6,3 \cdot 10^{-6}$  což je srovnatelná přesnost s přesností u kvalitního tenzometrického měření.



Obr. 2.15

Při použití reflexní fotoelasticimetrie si musíme uvědomit, že vlastně měříme určitou střední hodnotu  $(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})$  ve vrstvě, nikoliv na povrchu součásti, Obr. 2.15a, b. Veličinu  $(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_m$  na povrchu materiálu získáme ze vztahu :

$$(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_m = C_t (\varepsilon_I - \varepsilon_{II})_v \quad (2.22)$$

kde  $C_t$  Je korekční součinitel, závislý na poměru tloušťky vrstvy  $t_v$  a tloušťky součásti  $t_m$ , dále na způsobu namáhání a na materiálových charakteristikách  $E_m, \mu_m$ . Součinitele  $C_t$  lze stanovit výpočtem metodami prosté, resp. obecné pružnosti. Na Obr. 2.15c Je znázorněn průběh  $C_t$  pro namáhání prostým tahem a prostým ohybem.

Reflexní fotoelasticimetrii lze použít i pro namáhání cyklická, resp. aplikovat na rotující součásti. V těchto případech je nutno na měřené součásti umístit snímač, který dává impulsy pro zážehy stroboskopické lampy, která je nyní světelným zdrojem. S využitím stroboskopického efektu pozorujeme pak časově stálý obraz.

Typ	Materiál	$\varepsilon_{\max}$	E	$\mu$	$C_\varepsilon$	$K_\sigma$	$K_\varepsilon$	Tloušťka t	$T_{\max}$
		-	MPa	-		N/mm.řád	mm/řád	mm	°C
Reflexní	PS – 1	10	2500	0,38	0,15	6,95	$3,48 \cdot 10^{-3}$	0,25 0,50 1,00 2,05 3,05	150
	PS – 2	3	3100	0,36	0,13		3,33	1,00 2,05 3,05	260
	PS – 8	3-5	3100	0,36	0,09		2,30	na odlévání	200
	PL – 1	3-5	2900	0,36	0,10		2,56	1,00 2,05 3,05	230
	PS – 3	30	210	0,42	0,02		0,50	na odlévání	200
	PL – 2	50	210	0,42	0,02		0,50	0,50 1,00 2,05 3,05	200
	PS – 4	150	7	0,50	0,009		0,23	na odlévání	175
	PL – 3	110	14	0,42	0,006		0,153	3,20 6,35 12,70	150
Rovinná	CR – 39		2100	0,36		17,5	$11,33 \cdot 10^{-3}$	3,20 6,35 9,50	
	PSM – 5		3100	0,36		10,5	$4,6 \cdot 10^{-3}$		
	Chs 110					13,5			

Poznámka:  $K_\varepsilon = \lambda / C_\varepsilon$ ,  $\lambda = 5,77 \cdot 10^{-9} m$  pro bílé světlo

Tab. 2.1

## 2.4 Hodnocení fotoelasticimetrických metod

**Rovinná** fotoelasticimetrie dnes ustupuje, protože pokud známe okrajové podmínky, je vhodnější použít metody konečných prvků z hlediska rychlosti realizace, nákladů i většího množství získaných údajů.

**Prostorovou** fotoelasticimetrii lze vzhledem ke složitějšímu způsobu výroby modelu, zmrazování napjatosti a vyhodnocování měření provádět pouze na speciálně vybavených pracovištích. Její použití musí být zvažováno s možností použití metody konečných prvků. Má své opodstatnění v případech, kdy to závažnost řešeného úkolu vyžaduje a kdy neznáme okrajové podmínky.

**Reflexní** fotoelasticimetrie má svůj význam především jako metoda pro „zmapování“ pole napjatosti, zejména z hlediska posouzení homogenity a zjištění míst a gradienty napětí. Je vhodné jako metoda předcházející tenzometrickým měřením. Fotoelasticimetrii lze využít i pro vyšetřování časově proměnných namáhaných těles. Měřící metody se liší podle časového

průběhu vnějšího zatížení:

- jestliže je zatěžování periodické, pak se jako zdroj světla používá stroboskop, jehož záblesky jsou synchronizovány se zatížením,
- jestliže je zatížení neperiodické je nutno fotoelasticimetrické jevy zachytit fotokamerou. V případech rázových zatížení kdy se sleduje šíření napěťových vln, resp. při studiu šíření trhlin, kdy dynamické účinky rázu trvají cca  $1/250$  s je nutný velmi silný zdroj světla a speciální kamery schopné zachytit až 100 000 obrázků za sekundu.

Další případy využití fotoelasticimetrie:

- **termofotoelasticimetrie** (vyšetřování napjatosti způsobené teplotním zatížením fotoelasticimetrickými metodami),
- **fotoplasticita** (vyšetřování přetvoření a napjatosti v elasticko - plastické oblasti fotoelasticimetrickými metodami).

### 3 Křehké laky

Fyzikální podstata této měřicí metody spočívá v nízkých hodnotách průtažnosti pryskyřicových povlaků - tzv. křehkých laků. Jestliže je tento lak nanesen na povrch součásti, pak adheze laku k součásti je větší než kohezní síly v lakové vrstvě. Tato vlastnost laků vede k tomu, že při zatížení součásti se v lakové vrstvě objeví trhliny při podstatně menších přetvořeních  $\varepsilon$  než odpovídají porušení soudržnosti materiálu součásti. Trhliny mají směry kolmé na směr algebraicky největšího tahového přetvoření  $\varepsilon_I$ . Mezní přetvoření  $\varepsilon_{ML}$  laku, při němž v něm vznikají trhliny důsledkem zatížení, je označováno jako citlivost laku (menší hodnota  $\varepsilon_{ML}$  znamená vyšší citlivost laku).

Citlivost laku je dána jeho chemickým složením a je významně ovlivňována teplotou a vlhkostí prostředí. Proto je výrobci dodávají v modifikacích pro různé rozsahy teplot a vlhkosti.

Citlivost laku je ovlivňována i řadou dalších faktorů, mezi než patří tloušťka lakové vrstvy, rychlost zatěžování, charakter napjatosti, mechanická citlivost (při poklepu součásti prstem praská lak při menším  $\varepsilon_{ML}$ ), odchylky od předepsaného technologického zpracování při nanášení laku. Tyto faktory spolu se skutečností, že v provozních podmínkách zkušeben se obtížně udržuje konstantní teplota a vlhkost, vedou ke značným rozptylům citlivosti laku. Výrobci proto nevyrábějí laky s citlivostí vyšší, než 300  $\mu\text{m}/\text{m}$ , protože vzájemné působení uvedených faktorů by mohlo vést k takovému zvýšení citlivosti, že by mohlo nastat tzv. **mozaikové popraskání laku** (crazing). Citlivost laku se za daných provozně teplotních a vlhkostních podmínek zjišťuje experimentálně na zkušebním cejchovacím zařízení.

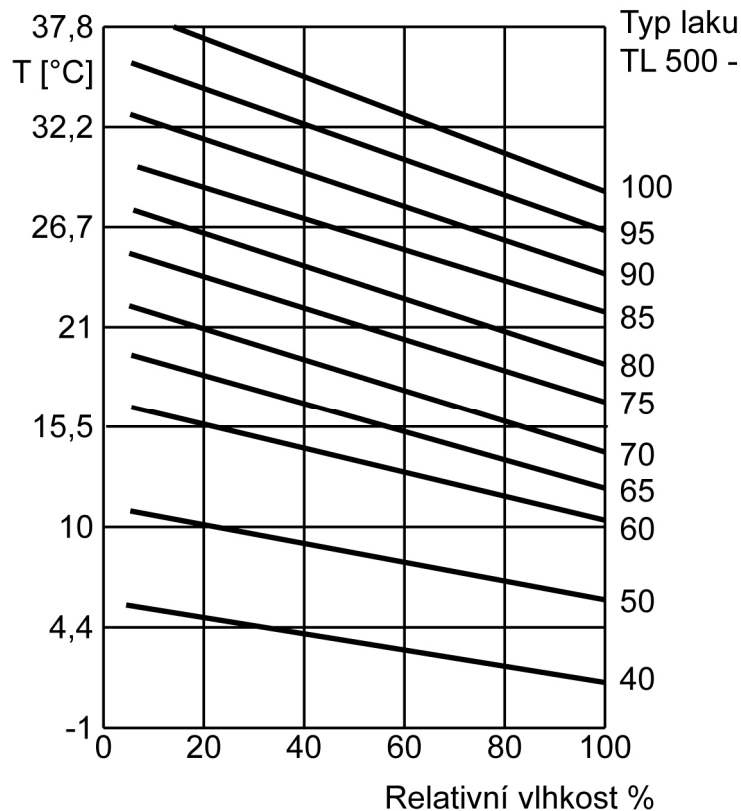
#### 3.1 Výrobci a dodavatelé křehkých laků

a) **BRAFA** - laky - vyrábí je firma HBM (SRN). Mají pevnou konsistenci, nanášejí se na zahřátou součást (130°C), suší se samovolným ochlazením a citlivost je málo závislá na vlhkosti okolí. Vyrábějí se ve třech variantách, odlišujících se teplotami, při kterých je nutná součást zatěžovat. Nanesená vrstva má mít tloušťku od 0,1 až 0,2 mm, (červená zbarvení), má být lesklá a nesmí být přepálená (žlutohnědá zbarvení). Trhliny v laku jsou zřetelné a po odlehčení součásti se nezavírají.

b) **TENS** - laky mají tekutou konzistenci a nanášejí se štětcem nebo nastříkují ze sprejových balení, a to několikrát za sebou. Tloušťka lakové vrstvy má být v rozmezí 0,03 až 0,1 mm. Citlivost laku je 500  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Vyrábí se v několika typech, jejichž výběr se řídí kombinací teploty  $T$  a relativní vlhkosti (Obr. 3.1). Nanáší se na součást při okolní teplotě a suší se při této teplotě cca 24 hodin. Výrobce udává, že při snížení relativní vlhkosti o 1% klesne citlivost

o 5  $\mu\text{m}/\text{m}$  a při poklesu teploty o 1°C se citlivost zvýší cca o 60  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Viditelnost trhlin se po odlehčení součástí zhoršuje.





Obr. 3.1

c) **STRESSCOAT** - laky vyrábí firma Magnaflux Corporation. Mají tekutou konzistenci a nanášejí se v několika vrstvách sprejem na konečnou tloušťku vrstvy 0,05 - 0,12 mm. Před aplikací je vhodné povrch nastříkat hliníkovým podkladem. Výběr typu laku se řídí obdobně jako u Tens-laků v závislosti na teplotě a vlhkosti okolí. Po nanesení lakové vrstvy (natíráním nebo sprejem) je nutné sušení po dobu 18 až 24 hodin. Nominální citlivost laku je 500  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Při změně relativní vlhkosti o 1% se změní citlivost o cca 2,5  $\mu\text{m}/\text{m}$ , při změně teploty o 1°C o cca 40  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Laky jsou nehořlavé, ovšem při aplikaci v nevětraných místnostech se musí používat ochranné masky.

### 3.2 Měření s křehkými laky

Laková vrstva nanesená dle návodu výrobce praská při zatížení součásti zákonitě ve směru kolmém na maximální tahové přetvoření. Trhliny v lakové vrstvě jsou tedy **izostatami** (tečny k nim určují hlavní směry přetvoření). Křehký lak reaguje pouze na  $\varepsilon > 0$ , takže v místech  $\varepsilon < 0$  zůstane povrch laku nepopraskaný. Izostaty v oblastech tlakových namáhání můžeme získat tzv. relaxačním přístupem. Lak se v tomto případě nanáší na zatíženou součást a po jeho technologickém zpracování (sušení, vytvrzení dle údajů výrobce) se součást odlehčí. V místech, v nichž je při zatížení součásti  $\varepsilon < 0$ , vzniknou v lakové vrstvě po odlehčení poměrná prodloužení ( $\varepsilon > 0$ ) a lak popraská. Přímým a relaxačním přístupem můžeme tedy získat hlavní směry po celém povrchu součásti. V místech, v nichž je  $\varepsilon < \varepsilon_{ML}$  lak nepopraská. Zde je někdy možné lehkým poklepem prstem na lakovou vrstvu porušit její rovnovážný stav a dosáhnout vytvoření trhlinek odpovídajících přetvoření od zatížení (silný poklep vede k chaotickému popraskání laku). Trhliny, které vznikají v laku jsou zejména u některých laků (Tens lak) velmi jemné a obtížně pozorovatelné. Lepší viditelnost lze dosáhnout:

- vhodným osvětlením - nejzřetelnější jsou trhliny kolmé na směr světelných paprsků,
- preparací povrchu vhodným nátěrem, (zinková nebo akvarelová běloba, stříbrný bronz) pokud to technologie zpracování laku při nanášení dovolí - u Brafalů, které se nanášejí při teplotách nad 100°C, se může nátěr opálit,
- zvýraznění trhlín vhodnými barvivy (obtažení bělobou, potřetí červení v parafinovém oleji, rhodamin ve vodě. ... apod.).

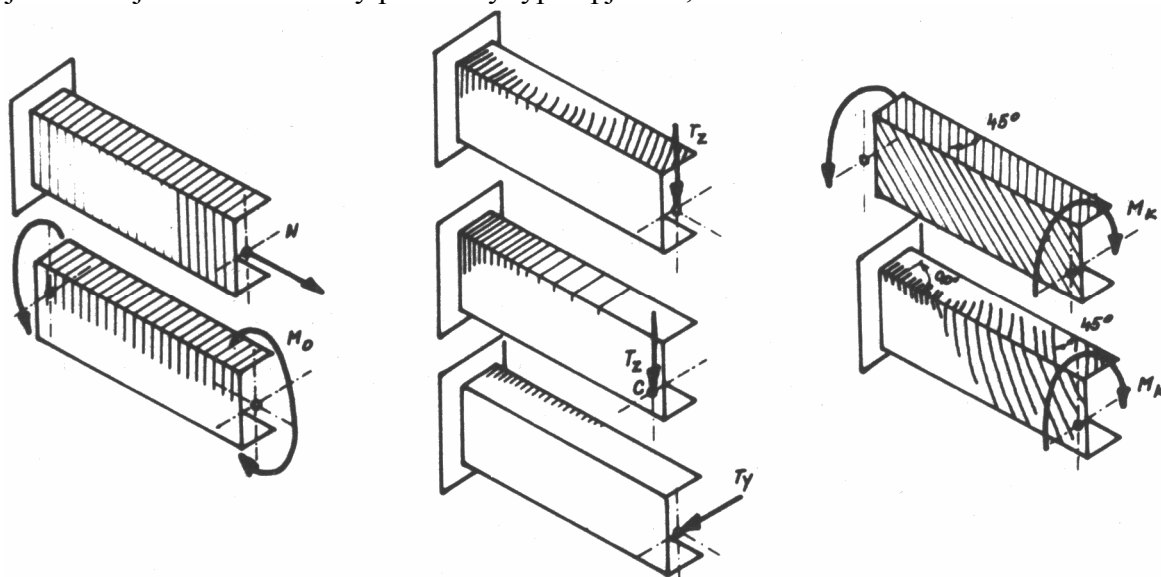
Před nanášením laku musí být povrch součásti upraven tak, aby byl hladký, bez rýh od broušení. Pokud se nebude preparovat reflexním nátěrem, musí být vyleštěn a musí být odmaštěn.

### 3.3 Aplikační sféry křehkých laků

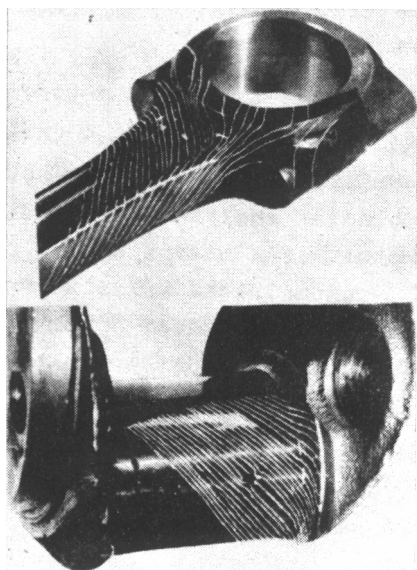
Křehké laky jsou vhodné pro určování míst s koncentracemi napětí. Je možno je použít pro určování směru hlavních napětí před podrobnější analýzou napjatosti, například tenzometrickými metodami. Známe-li na povrchu tělesa hlavní směry, není nutné lepit drahé tenzometrické růžice, stačí pouze tenzometrické kříže se snímači orientovanými v hlavních směrech. V literatuře se uvádí i možnost použití křehkých laků pro kvantitativní určování poměrných přetvoření. Zkušenosti však ukazují, že tato měření jsou těžce realizovatelná a výsledky z hlediska dosahované přesnosti měření neuspokojivé.

Křehké laky lze použít při statických, cyklických i rázových zatíženích. Na Obr. 3.2 jsou schematicky zakresleny charakteristické směry trhlín v laku při různých zatíženích prutu. Na Obr. 3.3 jsou průběhy trhlín u ojnice a u ložiskového čepu klikového hřídele, které byly namáhány krutem. Na Obr. 3.4 jsou lakové trhliny na radiální lopatce oběžného kola radiálního kompresoru leteckého motoru M 601. Jedná se o druhý tvar ohybového kmitu. Buzení lopatky se realizovalo přerušovaným proudem tlakového vzduchu.

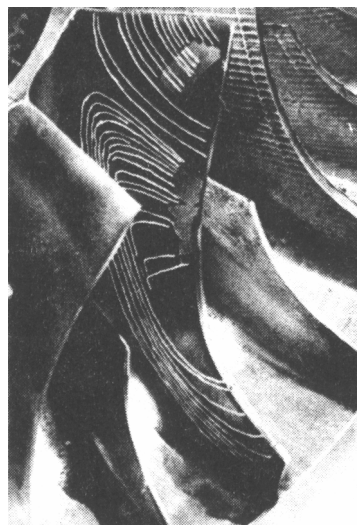
Metodu křehkých laků lze použít i pro kvalitativní vyšetřování zbytkové napjatosti, a to odvrtávací metodou. Po nanesení vrstvy je nutné ji v místě vyšetřování napjatosti odstranit, a to na kruhové plošce o průměru cca 3,5 mm. V tomto místě se pak odvrtá otvor o průměru 2-3 mm s hloubkou rovnou nejméně průměru otvoru. Jestliže má vlastní napjatost takovou hodnotu, že přetvoření  $\varepsilon$  překročí citlivost laku  $\varepsilon_{ML}$ , objeví se v blízkém okolí trhlínky, jejichž tvar je charakteristický pro určitý typ napjatosti, Obr. 3.5.



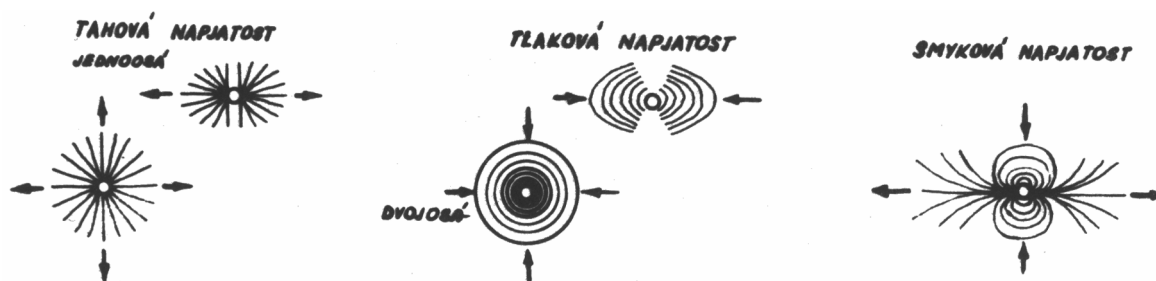
Obr. 3.2



Obr. 3.3



Obr. 3.4



Obr. 3.5

## 4 Metoda folie s praskavou vrstvou

Trhliny v křehkých lacích popsaných v předešlém odstavci vznikají na površích zatížených těles jen v úzkém rozsahu teplot (10 až 30°C podle typu laku). V řadě případů je však potřebné vyšetřovat napjatost i za teplot vyšších. Jsou proto snahy vyvinout vrstvy, u nichž by trhliny vznikaly i při teplotách vyšších nad uvedených 30°C. V bývalém SSSR byla rozpracována metoda, u níž praskavá vrstva je vytvořena povrchovou oxidací hliníkové folie, která se přilepí na povrch vyšetřované součásti epoxidovou pryskyřicí.

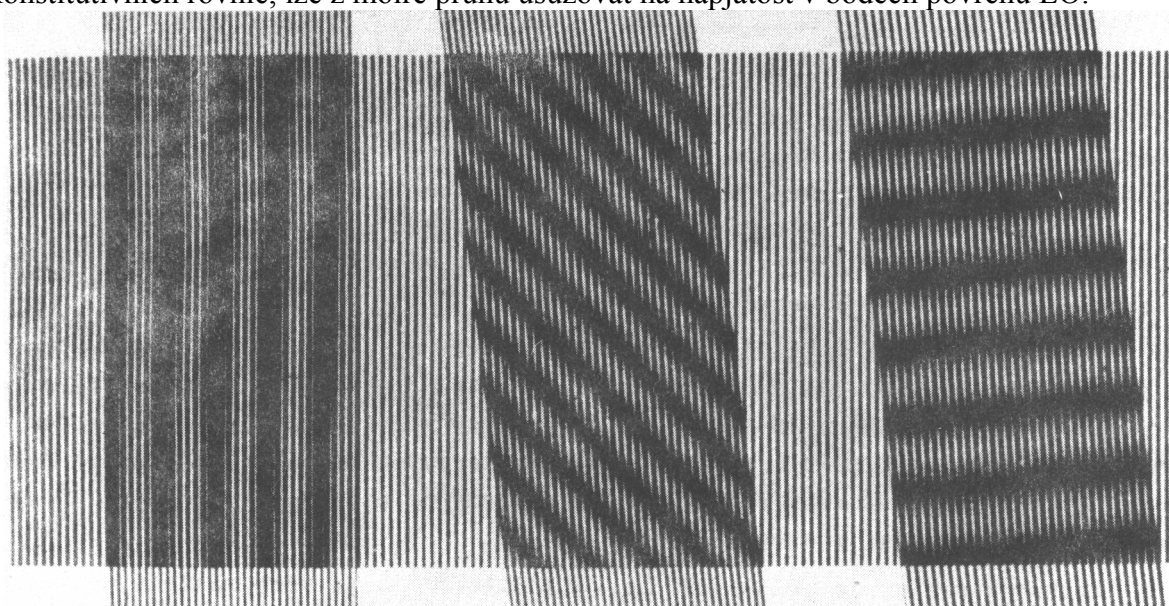
Vrstva se vytváří galvanickým procesem (elektrolytem je zředěná  $H_2SO_4$ ) na folii o tloušťce 80-120  $\mu m$  vyrobené z čistého hliníku. Oxidační vrstva má sklovitý charakter a tloušťku 20-30  $\mu m$ . Lze vytvářet vrstvu na folii o ploše cca 2  $dm^2$ . Vrstvu lze vytvořit i přímo na povrchu kovových součástí tak, že se na povrch elektrolyticky nanese vrstva hliníku o tloušťce cca 80-120  $\mu m$  a na ní se vytvoří citlivá oxidační vrstva.

Citlivost vrstvy je přibližně  $\varepsilon_{ML} = 100 \cdot 10^{-6}$ , je však závislá na teplotě při níž byla folie lepena a na teplotě při níž se součást zatěžuje. Proto je nutné cejchování citlivosti při stejných teplotních podmínkách zpracování a měření. Vrstva nemění  $\varepsilon_{ML}$  ve vodě, olejích a ředidlech ani skladováním. Lze ji aplikovat v rozmezí teplot 0 až 100°C.

Metoda se používá zejména pro určování míst s koncentrací napětí a pro vyšetřování hlavních směrů napětí.

## 5 Metoda moiré

Interferenční moiré metoda je založena na mechanicko-optické interferenci obvykle dvou překrývajících se **rastrů (mřížek)**. Tyto jsou tvořeny soustavou čar, nejčastěji rovnoběžných přímek, nebo soustavou bodů (Obr. 5.7). U nejčastěji používané, tzv. přímé metody moiré se jedna z mřížek, tzv. **měřicí (modelová)**, shodně deformuje s povrchem vyšetřovaného tělesa (EO) s nímž je spojena; druhá, tzv. **referenční mřížka** je uložena v těsné blízkosti měřicí mřížky. Jestliže se povrch tělesa deformuje, pak po jeho prosvícení (u průhledných tj. transparentních materiálů) nebo nasvícení (u materiálů s odrazivým povrchem) rovnoběžnými paprsky, se pozorovateli na stínítku objeví soustava tmavých a světlých pruhů - tzv. **moiré pruhů**, Obr. 5.1. Tvar a hustota těchto pruhů souvisí s deformačními posuvy EO. Na základě analýzy moiré pruhů, s využitím geometrických a konstitutivních rovnic, lze z moiré pruhu usuzovat na napjatost v bodech povrchu EO.

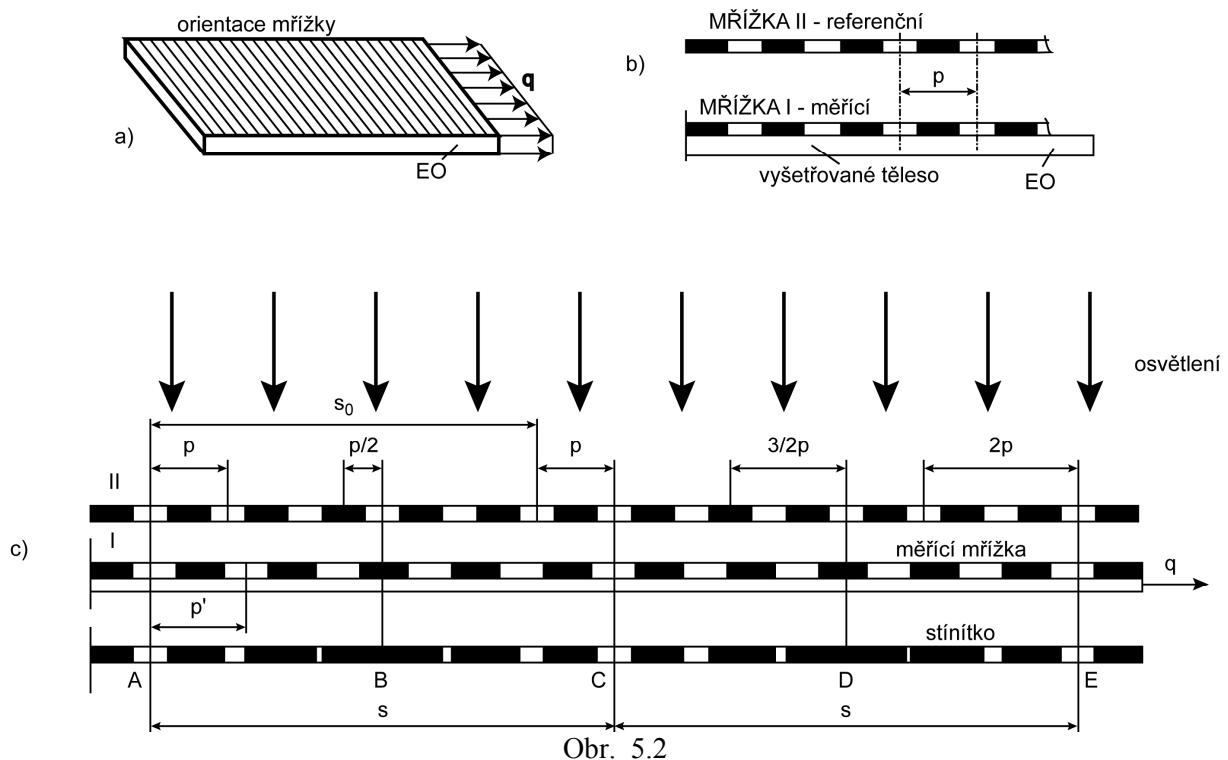


Obr. 5.1

### 5.1 Vlastnosti moiré pruhů

Základní vlastnosti moiré pruhů si ilustrativně ukážeme na případě rovinné napjatosti u geometricky rovinného tělesa. Rovinná napjatost např. vznikne v dostatečné vzdálenosti od vetknutí stěny zatížená dle Obr. 5.2a. Měřicí i referenční mřížka nechť jsou tvořeny soustavou rovnoběžných čar, které mají stejnou rozteč  $p$ , tzv. **modul mřížky**. Měřicí mřížku pevně spojíme se stěnou, referenční mřížku umístíme nad ní do takové polohy, že čáry obou mřížek se kryjí, Obr. 5.2b. Soustavu mřížek spolu se stěnou, která je zhotovena z průhledného materiálu prosvítíme rovnoběžnými světelnými paprsky. Pokud je stěna nezatížena, na stínítku se objeví soustava rovnoběžných čar se stejnými roztečemi jako mají mřížky.

Jestliže stěnu zatížíme, pak se rozteče měřicí mřížky změní na určitou hodnotu  $p'$ . Světelné paprsky jsou pak soustavou mřížek v některých místech zadrženy, takže na stínítku se objeví soustava tmavých a bílých pruhů, Obr. 5.2a a Obr. 5.1. Na Obr. 5.2c jsou v místech A,C,E osy světlých pruhů, v místech B, D osy tmavých pruhů. Z tohoto obrázku je též zřejmé, že první světlý pruh ve směru prodloužení (místo C) odpovídá prodloužení měřicí mřížky o jednu rozteč  $p$ , druhý světlý pruh (místo E) o dvě rozteče. Obecně tedy, v místě  $n$ -tého moiré pruhu má posuv vyšetřovaného tělesa hodnotu  $u = np$ .



Obr. 5.2

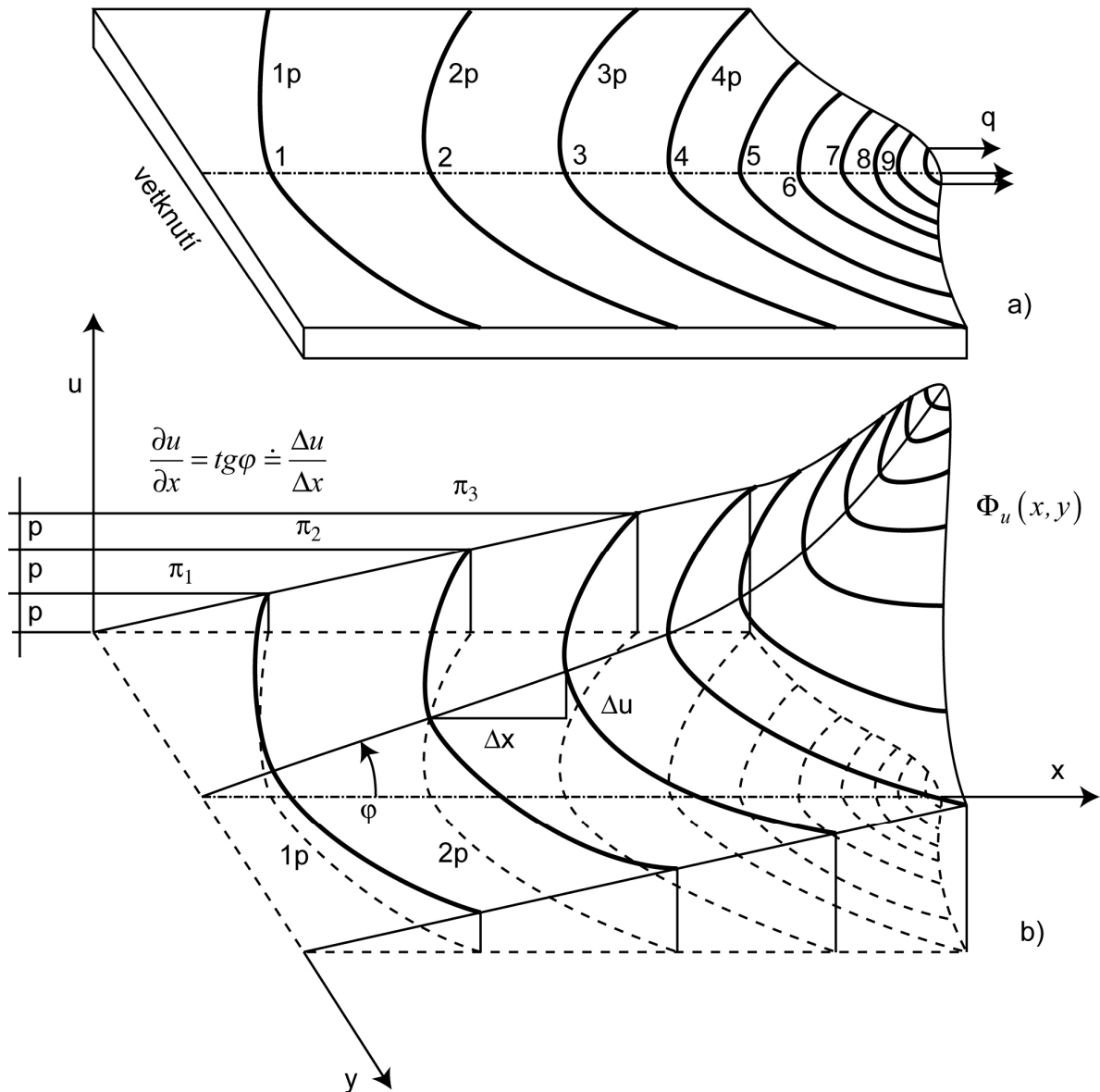
Lze tedy konstatovat:

- moiré pruhy udávají hodnotu relativního posuvu ve směru kolmém na osnovu čar mřížky,
- moiré pruhy jsou geometrické místa bodů, které vykazují stejné posuvy ve směru kolmém na osnovu mřížky, (jsou to tzv. **izothety**).

Jednotlivé izothety tak udávají posuvy, které jsou násobky modulu mřížky  $p$ . Velikost posunutí v násobcích rozteče  $p$  mřížky označujeme jako **řád pruhu**, obdobně jako ve fotoelasticimetrii řád izochromaty.

V úvodu k metodě moiré jsme uvedli, že ji lze použít k určování napětí na povrchu těles. Jelikož moiré pruhy souvisí s posuvy povrchu tělesa, k napětím se dostaneme přes geometrické rovnice a konstitutivní vztahy. Pro určování poměrných přetvoření  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  z posuvů  $u, v$  určených moiré metodou, je vhodné uvědomit si tyto geometrické interpretace. Složky  $u, v$  obecného posuvu bodu na povrchu rovinného tělesa jsou funkcemi souřadnic  $x, y$  tohoto bodu. Funkce posuvů  $\Phi_u(x, y), \Phi_v(x, y)$  lze znázornit jako plochy. Na Obr. 5.3b je znázorněna plocha  $\Phi_u(x, y)$  pro obdélníkovou stěnu vázanou a zatíženou dle Obr. 5.3a. Průsečnice plochy  $\Phi_u(x, y)$  s rovinami  $\Pi_i$  rovnoběžnými a rovinou  $(x, y)$  a vzdálenými od ní o hodnotu  $np$  vytváří na ploše vrstevnice, které jsou geometrickým místem bodů ležících na  $\Phi_u(x, y)$  a stejně vzdálených od roviny  $(x, y)$ . Promítneme-li tyto vrstevnice do roviny  $(x, y)$  dostaneme soustavu křivek s parametry  $np$ , kde  $n \in (0, 1, 2, \dots)$ , Obr. 5.3a. Tyto parametry jsou ale  $p$  násobky posuvu  $u$ , takže soustava křivek je vlastně soustavou moiré pruhů. Lze tedy říci:

- moiré pruhy jsou průměty vrstevnic plochy posuvu pro jeden hlavní směr, přičemž vrstevnice jsou od sebe vzdáleny o rozteč  $p$  mřížky,
- hustota moiré pruhů je přímo úměrná gradientu posuvu.



Obr. 5.3

## 5.2 Vyhodnocování napětí z moiré pruhů

### a) Jednoosá napjatost

Měřicí i referenční mřížka se orientují ve směru kolmém na směr nenulového hlavního napětí  $\sigma$ , Obr. 5.4. Délkové přetvoření je možné vyjádřit dvojím způsobem:

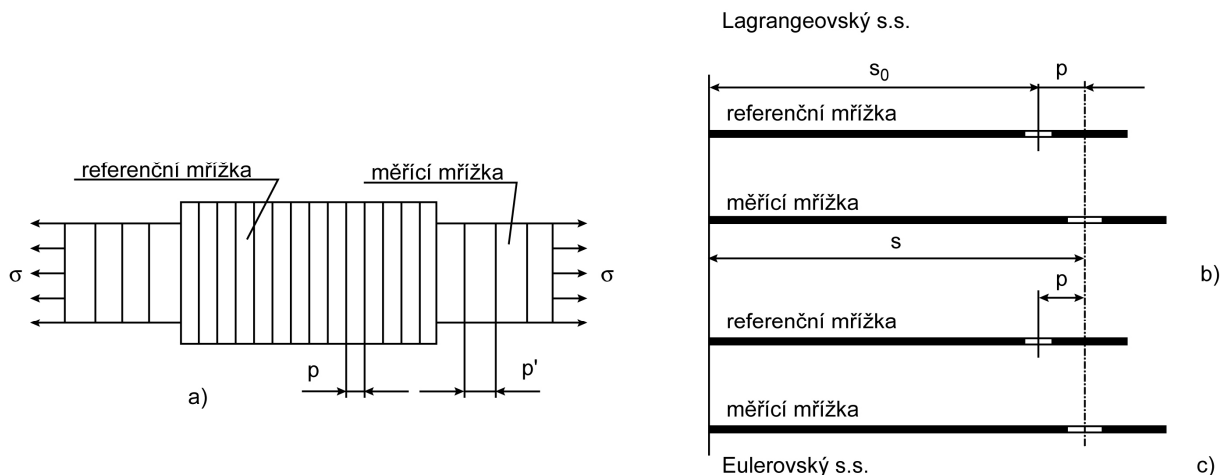
**Lagrangeovým** - souřadnicový systém je nanesen na nedeformované těleso (nezávisle proměnnou je počáteční souřadnice bodu před deformací), Obr. 5.4b. Jeho použití je běžné pro měření malých deformací. Mezi vzdáleností  $s$  moiré pruhů, modulem  $p$  mřížky a poměrným Lagrangeovským přetvořením  $\varepsilon^L$  platí vztah:

$$\varepsilon^L = \frac{p}{s_0}$$

kde  $s_0 = s - p$

takže:

$$\varepsilon^L = \frac{p}{s - p} \tag{5.1}$$



Obr. 5.4

**Eulerovým** - souřadnicový systém je nanesen na deformované těleso (nezávisle proměnnou je konečná souřadnice bodu po deformaci), Obr. 5.4c. Používá se pro vyhodnocování velkých deformací. Platí vztah:

$$|\varepsilon^E| = \frac{p}{s} \quad (5.2)$$

Mezi oběma přetvořeními platí vztahy:

$$\varepsilon^L = \frac{\varepsilon^E}{1 - \varepsilon^E}, \quad \varepsilon^E = \frac{\varepsilon^L}{1 + \varepsilon^L} \quad (5.3)$$

Absolutní hodnota ve vztahu (5.2) je zavedena proto, že  $p$  i  $s$  je vždy kladné. Není tedy možno rozeznat tahové namáhání od tlakového. Musí být zjišťováno podle smyslu síly, nebo ve složitějších případech natáčením rastru. Napětí se pak určí z Hookova zákona.

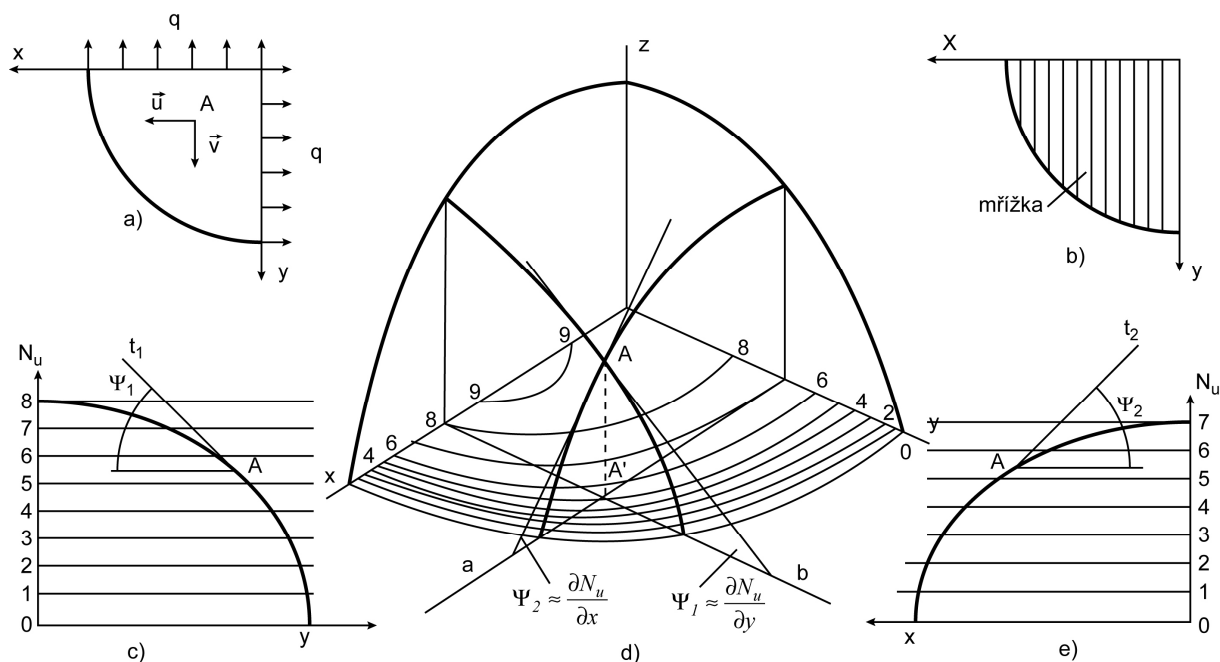
### b) Rovinná napjatost

Moiré metodou můžeme vyšetřovat pouze tělesa stěnového typu. Jestliže střednicovou rovinu ztotožníme se souřadnicovou rovinou ( $x, y$ ) pak moiré metodou můžeme vyšetřit posuvy  $u, v$ . Při určování posuvů  $u$  orientujeme čáry obou mřížek kolmo na osu  $x$ , Obr. 5.5b, při určování posuvů  $v$  zase kolmo na osu  $y$ . Postup při určování jednoho z posuvů (posuvu  $u$ ) ilustrujeme na čtvrtkruhové stěně zatížené a vázané dle Obr. 5.5a. Plocha posuvů  $\Phi_u(x, y)$  a moiré pruhy posuvů  $u$  jsou zakresleny na Obr. 5.5d. Chceme-li vyšetřit deformaci a napjatost např. v bodě A, pak bodem A' vedeme rovnoběžky  $a, b$  a osami  $x, y$  a sestrojíme závislosti  $(N_u, x)$  a  $(N_u, y)$ , Obr. 5.5c,e, kde  $N_u$  je řád moiré pruhy pro posuv  $u$ , v bodě A pak grafickou derivací zjistíme směrnice tečen  $t_1, t_2$ , určující v tomto bodě derivace:

$$\frac{\partial N_u}{\partial y} = \operatorname{tg} \psi_1, \quad \frac{\partial N_u}{\partial x} = \operatorname{tg} \psi_2 \quad (5.4)$$

Zcela obdobně získáme moiré pruhy i pro posuv  $v$  a odpovídající derivace  $\frac{\partial N_v}{\partial x}, \frac{\partial N_v}{\partial y}$ .

Derivace posuvů  $u, v$  jsou pak s derivacemi (5.4) vázány vztahy:



Obr. 5.5

$$\frac{\partial u}{\partial x} = p \frac{\partial N_u}{\partial x}; \frac{\partial u}{\partial y} = p \frac{\partial N_u}{\partial y} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = p \frac{\partial N_v}{\partial x}; \frac{\partial v}{\partial y} = p \frac{\partial N_v}{\partial y}$$

Poměrná přetvoření a zkos jsou pak určeny vztahy:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = p \frac{\partial N_u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = p \frac{\partial N_v}{\partial y}; \gamma_{xy} = p \left( \frac{\partial N_u}{\partial y} + \frac{\partial N_v}{\partial x} \right) \quad (5.6)$$

Složky napětí získáme z konstitutivních vztahů. Pro lineárně pružný materiál je:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x), \tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (5.7)$$

Při rovinné napjatosti, která vzniká u těles stěnového typu, je deformace trojosá. Poměrné přetvoření  $\varepsilon_z$  určíme ze vztahu :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \rightarrow \varepsilon_z = \frac{-\mu}{1-\mu} (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (5.8)$$

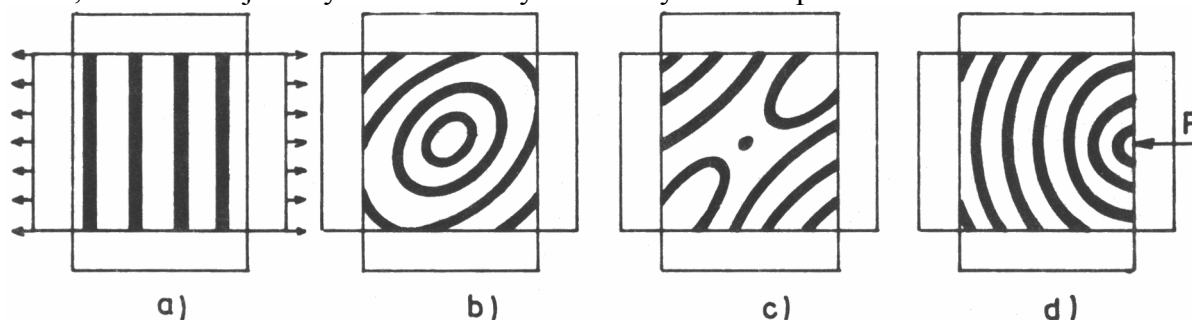
Na Obr. 5.6 jsou uvedeny některé základní typy moiré. Na Obr. 5.6a je to případ jednoosé tahové nebo tlakové napjatosti. Na Obr. 5.6b,c jsou znázorněny **singulární body**, na Obr. 5.6b tzv. **vrchol**, který odpovídá vrcholu plochy posuvů, na Obr. 5.6c, tzv. **důl**. Na Obr. 5.6d je moiré vznikající při působení osamělé síly.

### 5.3 Typy mřížek, jejich příprava a aplikace na EO.

Vhodnou geometrií mřížek lze podstatně ovlivnit vyhodnocování moiré záznamů. Nejobvyklejší typ mřížky je **čárové mřížka** se stejně širokými světlými i tmavými čarami, Obr. 5.7a. Dalším typem jsou mřížky s nestejně širokými světlými a tmavými čarami. Na Obr. 5.7b je znázornění tzv. **pozitivní** a **negativní** mřížky. Použití těchto mřížek, jedné ve funkci referenční a druhé ve funkci měřící mřížky, lze výrazně ovlivnit mřížku pruhů moiré.



Je-li poměr tmavých a světlých čar  $1 : 2$ , jsou pruhy moiré velmi jasné, ostré a podstatně užší, než v případě použití mřížek se stejnou šířkou tmavých a světlých čar. Používají se i tzv. **mřížky křížové**, Obr. 5.7c a **bodové**, Obr. 5.7d. Tyto mřížky propouštějí maximálně 25% světla, důsledkem je malý kontrast světlých a tmavých moiré pruhů.



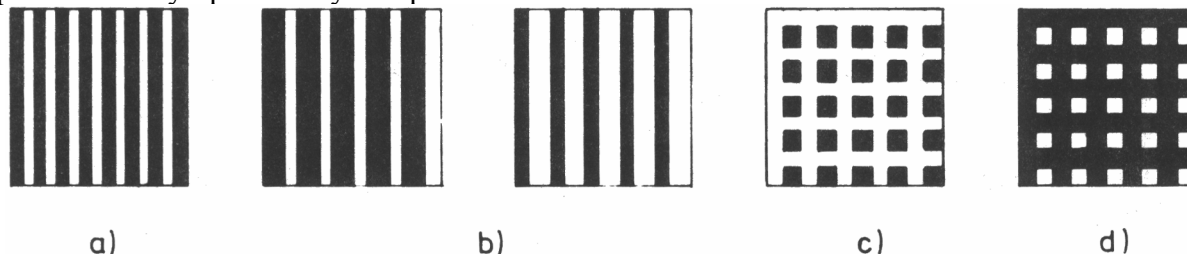
Obr. 5.6

Měřicí mřížky se na povrchu tělesa zhotovují dvěma základními způsoby: **nanášením** mřížek a **lepením** hotových mřížek.

Při prvním způsobu se na povrch tělesa nanese vhodná citlivá emulze, do níž je mřížka překopírována. Jeden typ emulze se vyznačuje tím, že ve vývojcce se odplaví osvětlená část emulze (tzv. **pozitivní emulze**), druhá se působením světla vytvrzuje (**negativní emulze**).

Je-li objekt EO kovový, je vhodné mřížku vyleptat a vyplnit vhodnými barvivy. Tmavé čáry mřížky tvoří barvivo, světlé čáry vyleštěný kov. Tyto mřížky dovolují měřit i v oblastech velkých plastických deformací.

Mřížku lze též nanášet pomocí galvanoplasticky zhotovené šablony, což je velmi tenká kovová folie s ortogonálními řadami otvorů. Šablona se přiloží na povrch tělesa, přeloží se filtračním papírem nasáklým inkoustem a přejeďte se gumovým válečkem. Inkoust se na povrchu zachytí povrchovým napětím.



Obr. 5.7

Při druhém způsobu se mřížky kopírují na speciální film, jehož podložku lze po přilepení citlivé vrstvy filmu na objekt EO odstranit. Jestliže se mřížka lepí na neprůhledné objekty je nutno zvýšit odrazivost vrstvy např. poprášením želatinové vrstvy před přilepením tenkou vrstvou bílého barviva.

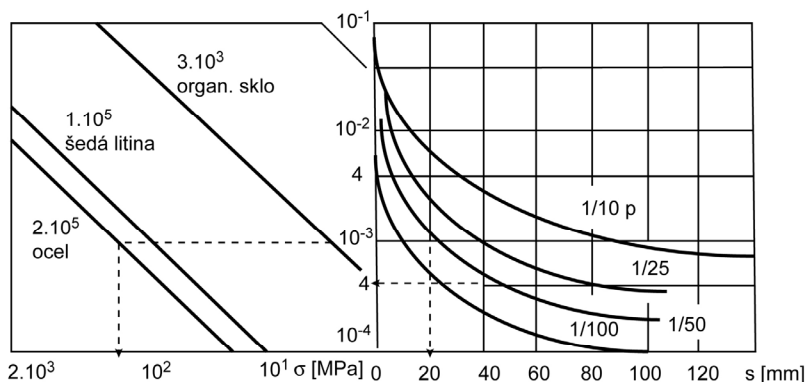
Existují i kovové mřížky lehce nalepené na podkladě z nerezavějící oceli, které se přitmelí na povrch tělesa a nerezový podklad se sloupne. Referenční mřížka musí ležet v těsné blízkosti měřicí mřížky a jejich roviny musí být rovnoběžné, což se zajišťuje v podstatě dvěma způsoby:

- **mechanickým** způsobem, kdy mřížka leží těsně u sebe - dokonalého styku obou mřížek se dosahuje např. použitím mezivrstvy nízkoviskozního oleje. Referenční mřížka musí být zabezpečena proti posunutí a pootočení,
- **optickým** způsobem - referenční mřížka je přiložena emulzní stranou na emulzi negativu ve fotoaparátu. Moiré pruhy vznikají přímo na negativu v obrazové rovině fotoaparátu.

$\varepsilon$ [-]	$\sigma$ [MPa]	$s$ [mm]
$10^{-5}$	2	2000
$10^{-4}$	20	200
$10^{-3}$	200	20
$10^{-2}$	2000	2

platí pro  $p=0,02$

Tab. 9



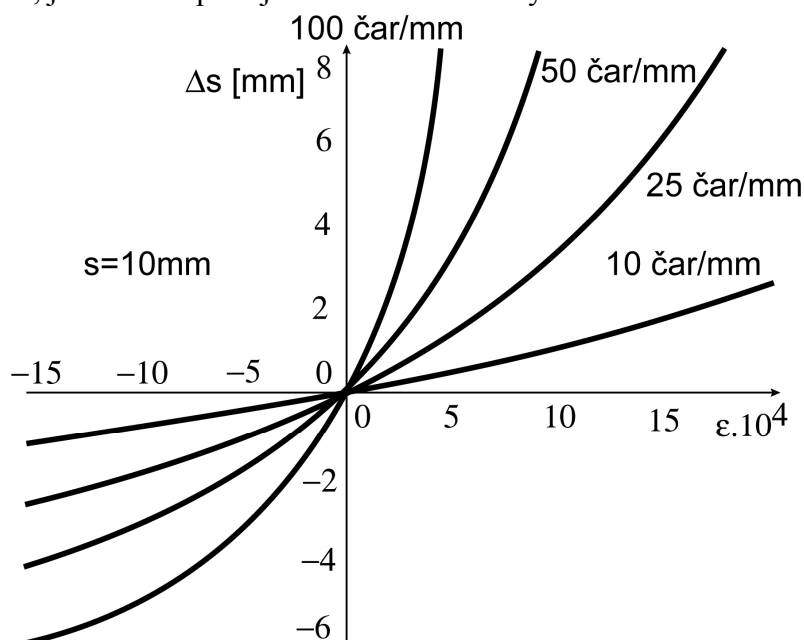
pro  $\sigma=200$  MPa je ocel:  $\varepsilon^E=1.10^{-3}$ ;  $s=20$  mm  
 $p=0,02$  mm org.skle:  $\varepsilon^E=66.10^{-3}$ ;  $s=0,3$  mm  
 Obr. 5.8

### 5.4 Citlivost a přesnost moiré metody

Přesnost moiré metody závisí především na hustotě a kvalitě vzniklých moiré pruhů; čím hustší je mřížka, tím jsou pruhy ostřejší. Hustota mřížek je však omezena především technikou nanášení - (horní hranice je cca 50 až 80 čar/mm) a vznikem difrakce světla (asi při 100 čarách/mm). O vazbě mezi geometrií mřížky (rozteč  $p$ ), přetvořením  $\varepsilon$ , napětím  $\sigma$  a vzdáleností  $S$  moiré pruhů lze usuzovat ze vztahů:

$$\varepsilon^E = \frac{p}{s} \quad a \quad \sigma = E\varepsilon^E \Rightarrow \sigma = E \frac{p}{s}$$

které jsou v grafické formě znázorněny na Obr. 5.8. Z tabulky T9 platné pro mřížku s 50-ti čarami/mm ( $p - 0,02$  mm) a pro ocel ( $E = 2.10^5$  MPa) a z Obr. 5.8 je zřejmé, že metoda moiré není zvláště citlivá, jestliže se aplikuje na kovové EO. Zvýšení citlivosti metody je možné:



Obr. 5.9

- použijeme-li EO z **nízkomodulových materiálů** (organické sklo  $E = 3.10^3$  MPa, polyesterové pryskyřice  $E = 5 - 50$  MPa),
- použitím tzv. **diferenčního moiré**, u něhož referenční mřížka má rozteč  $p(1 + \kappa)$  kde

$\kappa \ll 1$ . V tomto případě se již při nezatíženém EO vytvoří tzv. **počáteční moiré** se vzdáleností pruhů  $s$ . Jestliže při zatížení se pruhy posunou o  $\Delta s$ , odpovídající  $\varepsilon^E$  je dáno vztahem:

$$\varepsilon^E = \frac{\Delta s}{s^2 + \Delta s \cdot s} p \quad (5.9)$$

Pro základní vzdálenost pruhů  $s = 10\text{mm}$  je vztah (5.9) znázorněn na Obr. 5.9. Z obrázku je zřejmé, že citlivost diferenční metody (daná  $\Delta s$ ), je poměrně vysoká a že roste rychleji než hustota mřížek. Přesnost měření pak závisí na přesnosti odečtení  $s$  a  $\Delta s$ . Moiré pruhy by měly být úzké a výrazné, aby bylo možno určit jejich střed. Za dosažitelnou přesnost čtení se považuje absolutní chyba  $\Delta s = \pm 0,1\text{mm}$ . Abychom si učinili názor o přesnosti metody, stanovme jaká jsou potřebná  $\varepsilon$  k tomu, abychom při základní vzdálenosti pruhů  $s = 10\text{mm}$  a při chybě čtení  $\Delta s = \pm 0,1\text{mm}$ , dosáhli relativní chyby 5%, resp. 1%. Výsledky jsou v Tab. 5.1.

Relativní chyba		5%	1%
Potřebná vzdálenost $\Delta S$		2mm	10 mm
Potřebné poměrné přetvoření $\varepsilon$	Mřížka 25 čar/mm	$6,66 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
	Mřížka 50 čar/mm	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$

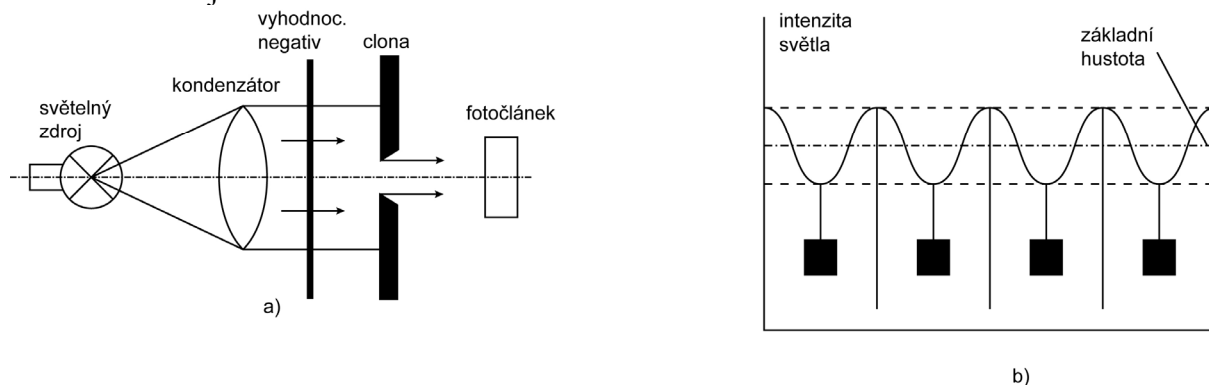
Tab. 5.1

### 5.5 Vyhodnocení měření pomocí přístrojů

Při vyhodnocení měření je nutné zvládnout tyto činnosti:

- záznam moiré pruhů na negativní materiál,
- vyhodnocení záznamů:
  1. najít místa maximální a minimální intenzity zčernání záznamů a určit jejich vzdálenosti,
  2. odhadnout polohu tečny ke křivce (moiré pruhu) při grafické derivaci, vzhledem k základnímu souřadnicovému systému.

Pro určování intenzity zčernání byla vyvinuta řada přístrojů. Na Obr. 5.10a je schéma tzv. **denzitometru**. K měření intenzity se používají fotoodpory, které podle intenzity dopadajícího světla mění odpor. Jsou zapojeny do můstku a změnu protékajícího proudu lze registrovat a zpracovávat. Celé zařízení je umístěno na pohyblivých saních, které umožňují plynulý posuv a tím postupný záznam moiré pruhů po celé ploše negativu. Přístroj umožňuje vyhodnotit vzdálenost pruhů a souřadnice vyhodnocovaného místa. Ukázka tměny intenzity světla určená denzitometrem je na Obr. 5.10b.



Obr. 5.10

K určení směrů tečen k moiré pruhům při ruční grafické derivaci se používají různé pomůcky,

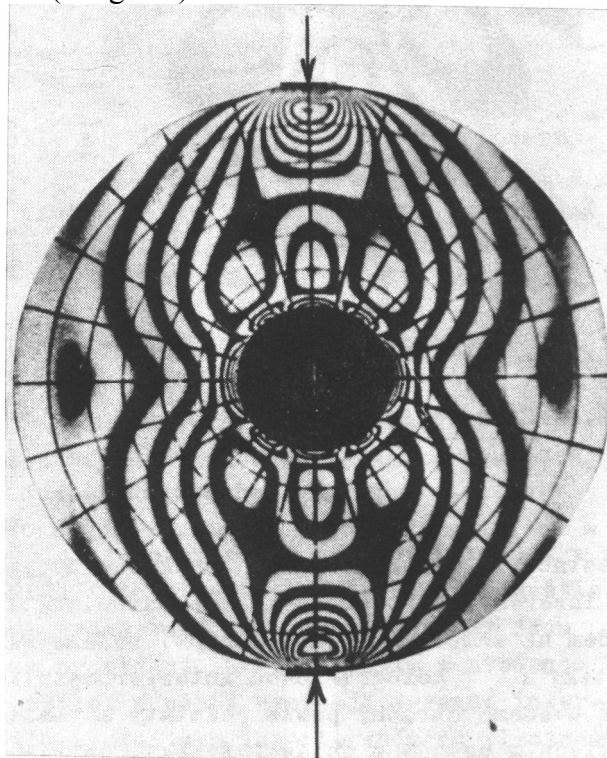
např. zrcadlová pravítka, hranolové derivátory apod. V současné době se vyhodnocování derivací provádí počítačově, s využitím splajnů.

## 5.6 Typy metody moiré a její současné postavení v metodách EAN

Metodu moiré lze členit podle různých kritérií. Z hlediska způsobu získávání moiré pruhů je vžitě členění na přímou a reflexní moiré metodu.

**Přímá metoda moiré** (metoda in-plane) je metoda, o níž jsme doposud hovořili. Je pro ni charakteristická existence dvou mřížek, měřicí a referenční, které leží v rovnoběžných rovinách (in-plane). Pozorování se provádí přímo, přes obě mřížky.

**Reflexní metoda moiré** (odrazivá - Ligtenbergova) - používá se pro vyšetřování deformačně napjatostních problémů desek. Rastr je na desce proveden soustavou rovnoběžných čar. Na fotografickou desku se zaznamená osvětlený rastr a po zatížení desky (která se prohne) rastr deformovaný. Po vyvolání desky se objeví moiré pruhy. Je to obdobný postup jako při dvojexpoziční holografické interferometrii. Tato metoda dává celoplošný přehled o deformaci desky. Je vhodná pro řešení problému desek s proměnnou tloušťkou, anizotropních, žebrovaných, děrovaných, bimetalických, voštinových a jiných typů desek. Lze ji také využít pro řešení problémů chvění desek. V tomto případě se deska osvětluje stroboskopicky, nebo se využívá toho, že fotografická deska působí jako časový integrátor a při kmitání zaznamenává moiré pruhy vzniklé v krajních výchylkách - obdoba holografické metody časového průměru (integrace).



Obr. 5.11

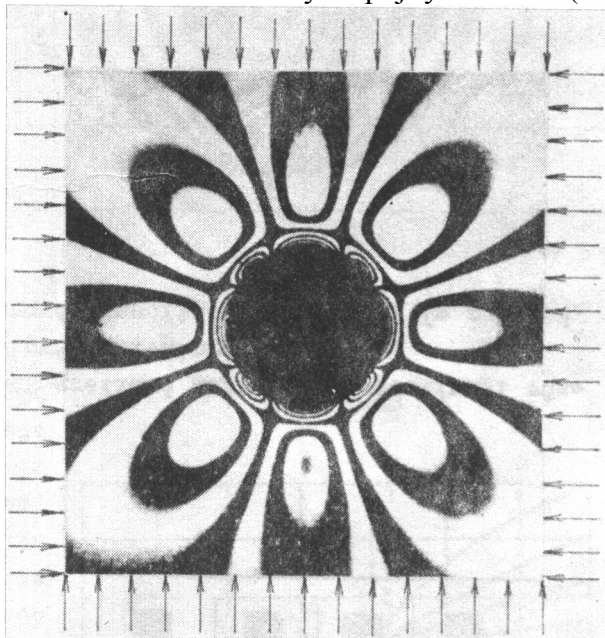
Podle časového charakteru přetvoření  $\varepsilon$  vyšetřovaného moiré metodou, lze ji členit na **statickou** a **dynamickou**.

Podle vzájemné vazby mezi geometriemi měřicí a referenční mřížky lze moiré metodu členit na **základní** (rozteče obou mřížek stejné) a **diferenční** (viz bod 4 tohoto odstavce).

S rozvojem konečných prvků ustoupila metoda moiré poněkud do pozadí zájmu experimentátorů, zcela obdobně jako rovinná fotoelasticimetrie. Stále má však své postavení

při vyšetřování velkých deformací, při řešení elastickoplastických problémů, při vyšetřování deformace a napjatosti stěn a desek anizotropních, na pružném podkladě, bimetalických, z kompozitních materiálů, voštinových apod. Dále je vhodná při studiu problémů stability stěn, kmitání stěn a desek a při řešení problémů teplotních napětí.

Na závěr tohoto odstavce uvádíme ukázky moiré pruhů u mezikruhové stěny zatížené dvěma radiálně působícími osamělými silami (Obr. 5.11) a čtvercové stěny s kruhovým otvorem, zatížené po celém obvodě rovnoměrným spojitým tlakem (Obr. 5.12).



Obr. 5.12

## 6 Holografické metody

Vynálezem laseru v šedesátých letech minulého století byla zahájena nová etapa rozvoje optiky a optických měřicích metod v různých oblastech vědy a techniky. Mezi význačné vlastnosti, která umožnily vzniknout novým měřicím metodám, patří vysoká intenzita laserem vyzařovaného koherentního světla a jeho vysoký stupeň koherence. Dříve, než uvedeme stručný popis podstaty a realizace těchto metod, vrátíme se k některým základním pojmům z oblasti fyziky, potřebným k pochopení uvedených metod.

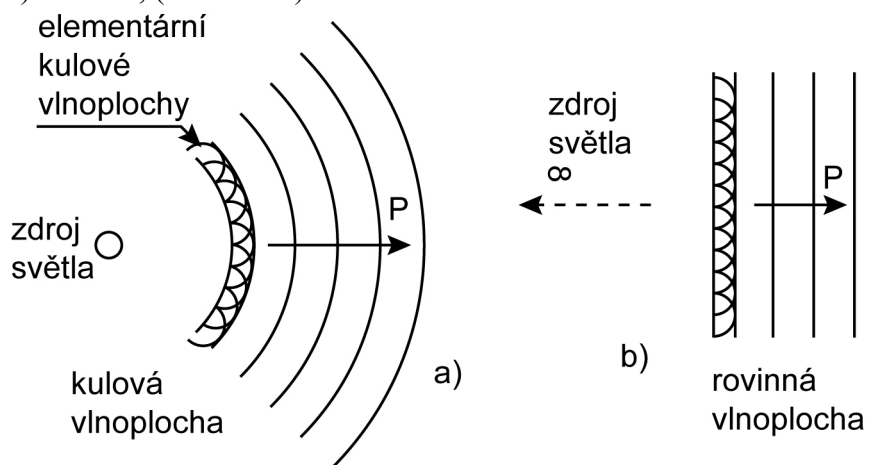
### 6.1 Základní pojmy

Šíření světelné energie ze zdroje se děje elektromagnetickými vlnami. Nejjednodušším tvarem je monochromatická harmonická vlna vyjádřená funkcemi sinus a kosinus, u níž mezi frekvencí kmitů  $f$ , rychlostí šíření vlny v prostředí  $c$  a vlnovou délkou  $\lambda$  platí vztah  $c = \lambda f$ . Při šíření světelných vln prostorem existují v něm taková body, v nichž mají kmity stejnou fázi. Plocha, která je proložena těmito body se označuje jako **vlnoplocha**. Lze tedy konstatovat:

**vlnoplocha je geometrickým místem bodů prostoru s konstantní fází kmitání.**

Vlnoplocha může mít obecný tvar. Často se setkáváme se dvěma zvláštními případy :

- **kulovou vlnoplochu** - vznikající při šíření světla z bodového zdroje homogenním a izotropním prostředím, (Obr. 6.1a)
- **rovinnou vlnoplochu** - kterou vytváří prakticky rovnoběžné paprsky (kolimované světlo) z laseru, (Obr. 6.1b).



Obr. 6.1

Lasery používané v holografii vyzařují světlo z tak úzkého spektrálního intervalu, že ho lze považovat za monochromatické. Protože výklad holografie vychází z interference monochromatických vln stejné vlnové délky v určitém čase, je vhodné vyjadřovat světelné vlny komplexními amplitudami v obecném tvaru:

$$U(x, y, z) = A(x, y, z) \exp[i\Phi(x, y, z)] \quad (6.1)$$

kde  $A(x, y, z)$  je reálná amplituda a  $\Phi(x, y, z)$  je fáze vlny. V holografické interferometrii nese světelný paprsek informaci o změně stavu vyšetřovaného předmětu, jak v amplitudě tak i ve fázi.

**Koherentní světlo** - monochromatické světlo, jehož zdrojem je laser, nemění v relativně dlouhém časovém intervalu fázi kmitů. Tato vlastnost vyzařovaného světla je důsledkem tzv. **stimulované emise** (fotony vyzařované jednotlivými atomy jsou „synchronizovány“), která vzniká v aktivním prostředí laseru. Světlo s uvedenou vlastností je označováno jako **koherentní světlo**, u něhož vznikají výrazné interferenční jevy. Vymezení koherentního světla z hlediska interferenčních vlastností je blíže rozvedeno v bodě d.

**Huygensův princip** vyjadřuje tento jev: každý bod vlnoplochy je zdrojem nových elementárních kulových vlnoploch, jejichž obálka je novou vlnoplochu.

**Interference světla** - uvažujme nejprve interferenci dvou kulových světelných vln, vysílaných dvojicí koherentních zdrojů  $S_1, S_2$  (Obr. 6.2a), tj. zdrojů, která kmitají s konstantním rozdílem fází. Výsledná intenzita  $I$  v libovolném bodě  $P$  prostoru, kde se tyto vlny překrývají, je rovna součtu intenzit  $I_1, I_2$  obou vln a interferenčního členu  $J_{1,2}$ :

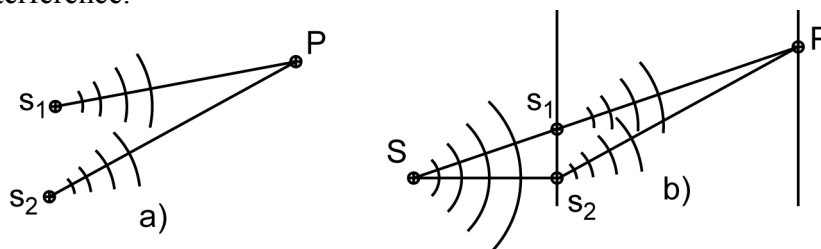
$$I = I_1 + I_2 + J_{1,2}; \quad J_{1,2} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)$$

Hodnota interferenčního členu závisí na rozdílu fází, s nimiž se obě vlny v bodě  $P$  setkávají. Maximální hodnoty  $+2\sqrt{I_1 I_2}$  nabývá, setkávají-li se vlny v bodě  $P$  ve stejné fázi ( $\Delta\varphi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$ ), minimální hodnoty  $-2\sqrt{I_1 I_2}$  tehdy, je-li jejich fáze v  $P$  opačná ( $\Delta\varphi = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots$ ).

Interferující světelné vlny nejsou vzájemně nezávislé, vznikají dělením jediné, primární vlny (Obr. 6.2b). Otvory  $S_1, S_2$  ve stínítku osvětlené ze zdroje se stávají podle Huyghens-Fresnelova principu sekundárními zdroji. Rozdíl fází v bodě  $P$  je úměrný rozdílu optických drah:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(SS_2P - SS_1P) = 2\pi s \quad (6.2)$$

kde  $s$  je řád interference.



Obr. 6.2

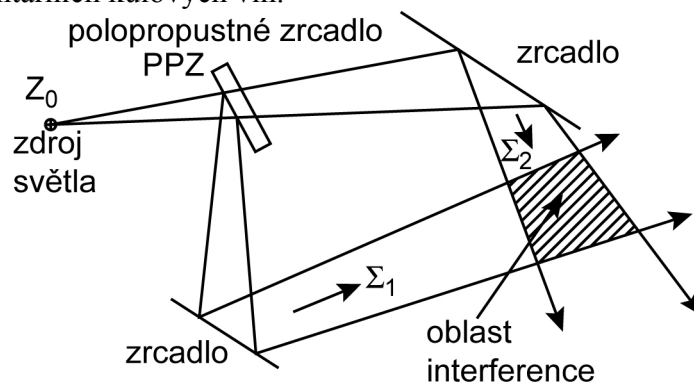
Typické interferenční jevy - soustavu světlých a tmavých pruhu na stínítku - pozorujeme jen tehdy, je-li světlo koherentní z hlediska interferenčních vlastností. V souladu s Obr. 6.3 vlny  $\Sigma_1, \Sigma_2$  budou interferovat jen tehdy, když rozdíl drah vln  $\Sigma_1, \Sigma_2$  od PPZ do místa kde mají interferovat, bude menší, než tzv. **koherenční délka světla**, vymezená jako největší délka dráhového rozdílu vln  $\Sigma_1, \Sigma_2$  při níž ještě nastane interference.

**Koherenční délka světla je různá podle typu světla:**

u běžných monochromatických zdrojů (např. sodíkové světlo), je rovna několika vlnovým délkám  $\lambda$ , tj. řádově  $10^{-6}$ m. Tyto světelné zdroje jsou pro vyšetřování interferenčních jevů nevhodné, u světla z laserů je koherenční délka světla řádově 1 mm až  $10^3$  m, což činí tento zdroj vhodným pro interferenční jevy.

**Difrakce světla** nastává, vložíme-li nepropustný objekt do homogenního a izotropního

prostředí, kterým se šíří světelná vlna. Šíření světla za tímto objektem může být vysvětleno Huygens-Fresnelovým principem, kdy každý bod vlnoplochy je sekundárním zdrojem světla vysílajícím kulovou vlnu; stav vlnění v libovolném bodě prostoru je pak určen interferencí všech těchto elementárních kulových vln.

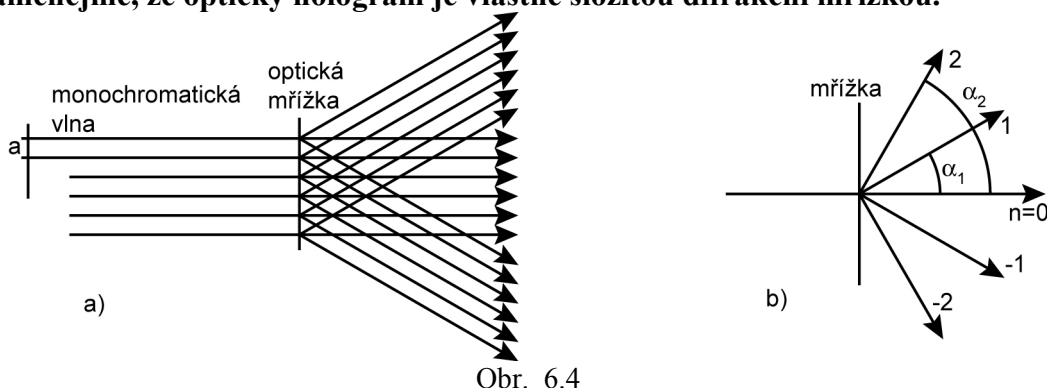


Obr. 6.3

Typickým příkladem difrakce je průchod rovinné monochromatické vlny optickou mřížkou, (Obr. 6.4a), soustavou rovnoběžných štěrbin stejné šířky a stejné od sebe vzdálených); po průchodu mřížkou je světlo modulováno řadou maxim odchýlených od přímého směru o úhel  $\alpha_n$  (Obr. 6.4b):

$$\sin \alpha_n = n \frac{\lambda}{a} ; \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

**Poznamenejme, že optický hologram je vlastně složitou difrakční mřížkou.**



Obr. 6.4

## 6.2 Holografické zobrazení předmětu

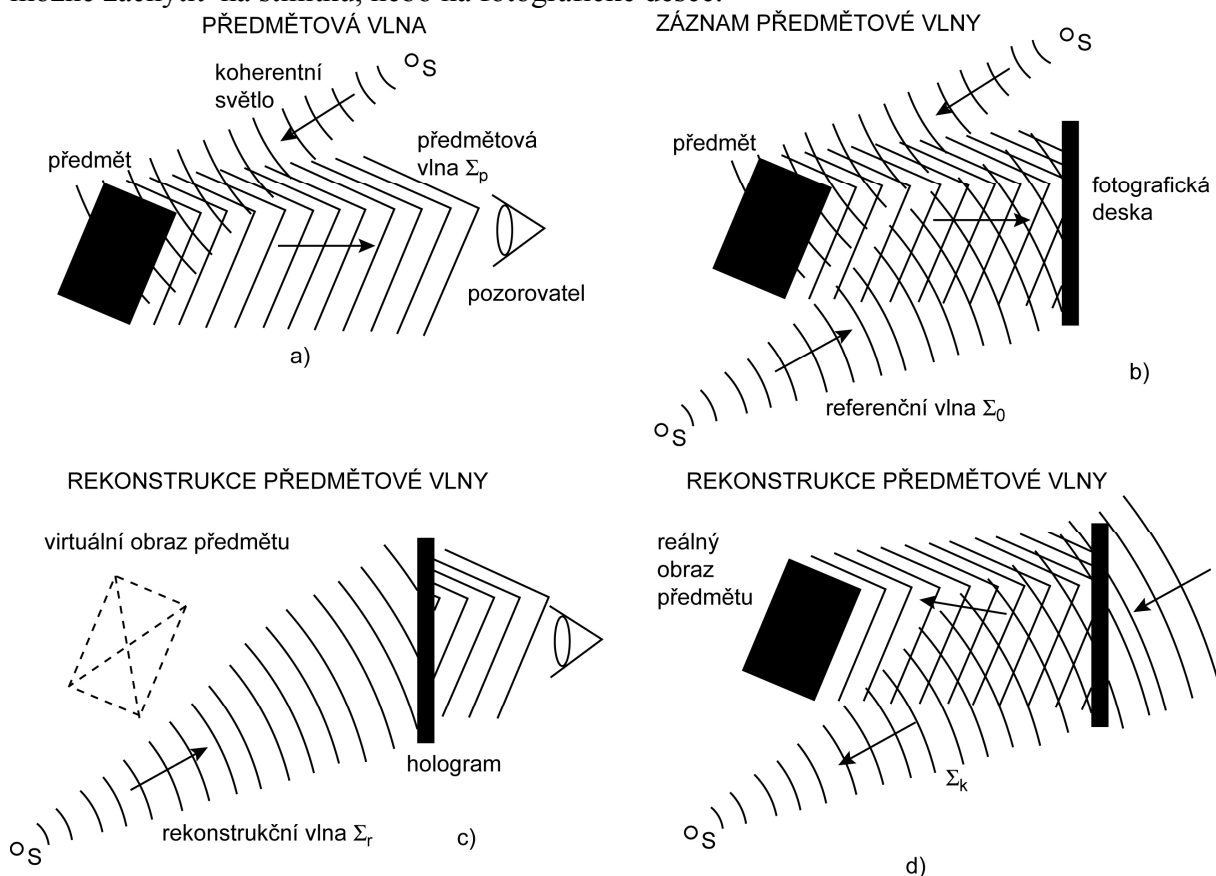
Uvažujeme předmět (EO), jehož povrch difusně odráží světlo. Takový povrch lze z optického hlediska považovat za množinu bodů, které se při osvětlení koherentním světlem stávají zdroji kulových ploch. Tyto vlny se skládají a vytvářejí **předmětovou vlnu**  $\Sigma_p$ , která zprostředkuje vidění předmětu, Obr. 6.5a. Chceme-li předmětovou vlnu zaznamenat na fotografickou desku, musíme ji nechat interferovat s jinou, tzv. **referenční vlnou**  $\Sigma_o$ , Obr. 6.5b. Na fotografické desce se pak zobrazí interferenční obrazec vln  $\Sigma_p, \Sigma_o$ . Deska se vyvolá a vrátí na původní místo. Tím se obdržel **hologram**, jako **úplný záznam světelné vlny**, který uchovává informaci o rozdělení její amplitudy a fáze.

Hologram umožňuje kdykoliv později rekonstruovat původní předmětovou vlnu  $\Sigma_p$  tím, že ho osvětlíme tzv. **rekonstrukční vlnou**  $\Sigma_r$ , Obr. 6.5c. Jestliže má rekonstrukční vlna stejný



směr s původní referenční vlnou, je **rekonstruovaná vlna**  $\Sigma_{re}$  totožná s vlnou předmětovou, která vytváří virtuální obraz předmětu v témže místě prostoru v jakém byl předmět (Obr. 6.5c). Virtuální obraz lze fotografovat, nebo pozorovat pohledem do rekonstruované vlny přes hologram.

Kromě virtuálního obrazu lze z hologramu rekonstruovat i obraz reálný. Vznikne ve skutečné velikosti a v témže místě prostoru kde byl původně předmět, jestliže použijeme k rekonstrukci tzv. konjugovanou vlnu  $\Sigma_k$  k původní referenční vlně  $\Sigma_r$  (konjugovaná vlna má ve všech bodech prostoru přesně obrácený směr, jako vlna referenční, Obr. 6.5d). Reálný obraz je možné zachytit na stínítku, nebo na fotografické desce.



Obr. 6.5

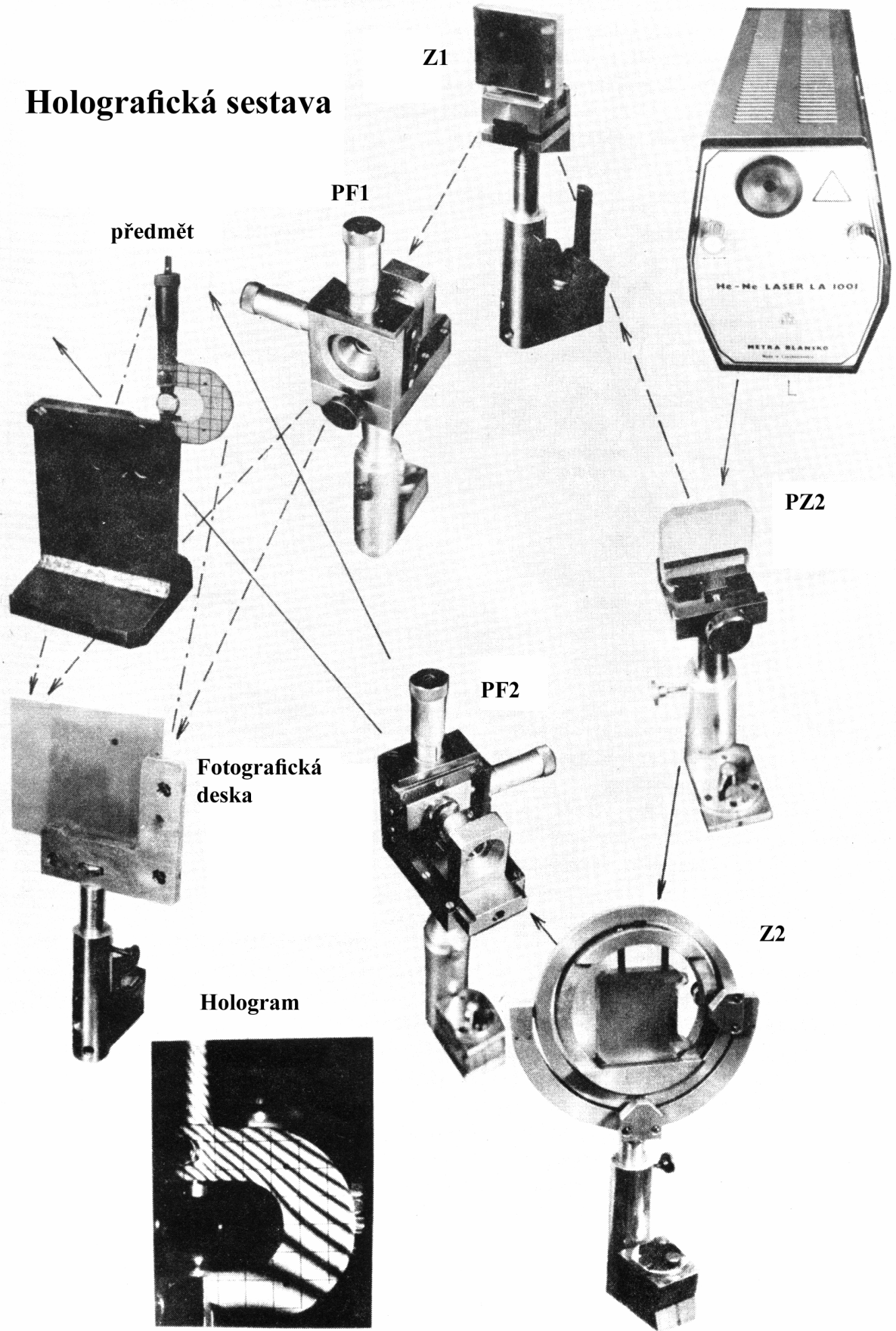
### 6.3 Holografická interferometrie

Na základě předchozího výkladu lze holografickou interferometrii (dále HI) vymežit takto :

Holografická interferometrie je způsob získávání a interpretace interferenčních obrazců, které vznikají superpozicí dvou nebo více koherentních vln, přičemž alespoň jedna z interferujících vln vznikla rekonstrukcí holografického záznamu.

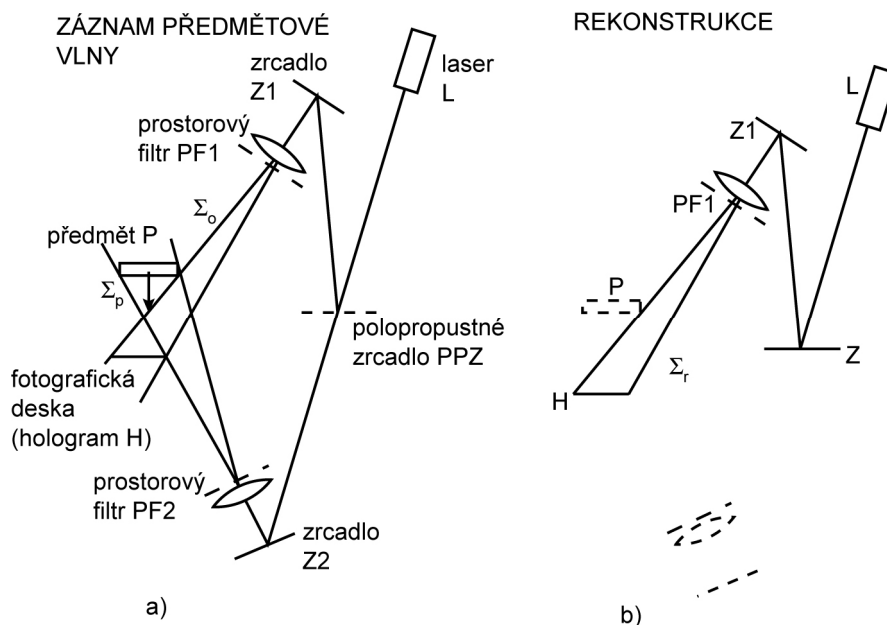
Pro oblast mechaniky těles je důležité, že holografická interferometrie umožňuje měřit rozdíl optických drah interferujících vln, který může být způsoben změnou tvaru nebo polohy objektu v prostoru. Holografická sestava pro realizaci holografické interferometrie je schematicky znázorněna na Obr. 6.7a. Na Obr. 6.6 je znázornění této sestavy s reálnými prvky. Koherentní světlo vycházející z laseru L je polopropustným zrcadlem PPZ rozděleno na dva svazky. Svazek odražený od PPZ se odráží od zrcadla Zl a po rozšíření prostorovým filtrem PF1 vytvoří referenční vlnu  $\Sigma_0$ .

# Holografická sestava



Obr. 6.6

Část svazku prošlá polopropustným zrcadlem je zrcadlem Z2 nasměrována na vyšetřovaný předmět a po rozšíření prostorovým filtrem PF2 tvoří vlnu osvětlující předmět. Tato vlna se po odražení od předmětu mění na vlnu předmětovou  $\Sigma_p$  a v místě jejího setkání s referenční vlnou  $\Sigma_o$  dochází k jejich interferenci. Do tohoto místa je vložena citlivá fotografická deska, na níž se zaznamená obrazec interferujících vln. Po chemickém zpracování desky vznikne **interferenční záznam – hologram**. Tento hologram lze rekonstruovat tak, jak je schematicky zobrazeno na Obr. 6.7b a bylo již popsáno v předcházejícím odstavci.

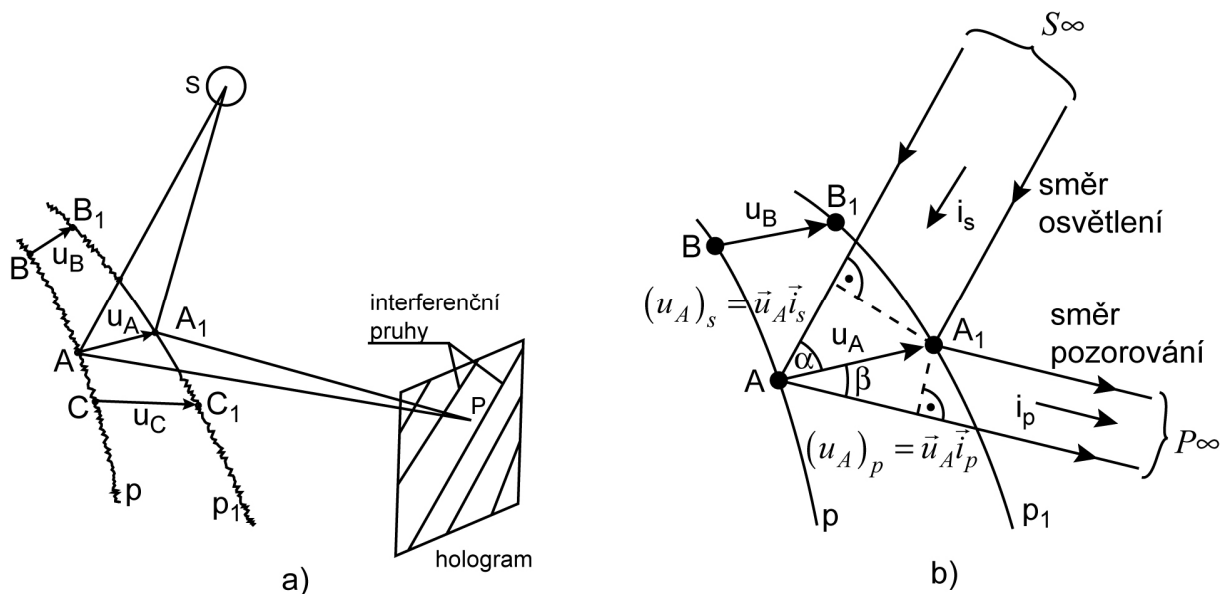


Obr. 6.7

Nyní si stručně objasníme jak lze s využitím holografické interferometrie studovat změny tvaru a polohy vyšetřovaného objektu. Předpokládejme, že hologram zaznamenaná předmětovou vlnu rozptýlenou na povrchu vyšetřovaného předmětu P, který je difúzně odrazivý a skládá se z velkého počtu náhodně rozmístěných a náhodně orientovaných drobných plošek (odpovídající povrchovému opracování předmětu). Předmětová vlna je pak velmi složitá a lze si ji představit jako součet velkého počtu kulových vln, které vycházejí z těchto plošek (Huygensův princip).

Hologram, který je po vyvolání umístěn přesně do téže polohy, v níž byl exponován, rekonstruujeme vlnou  $\Sigma_r$ , která je identická s vlnou referenční  $\Sigma_o$ . Jak je známo z předcházejícího odstavce, rekonstruovaná vlna vytvoří zdánlivý (virtuální) obraz totožný s vyšetřovaným předmětem. Znamená to, že jestliže se díváme přes hologram ve směru šíření rekonstruované vlny, zdá se nám, že vidíme předmět na stejném místě, stejně osvětlený a se stejnou strukturou povrchu jako při záznamu. Jestliže nyní předmět posuneme, natočíme (tedy realizujeme pohyb předmětu jako celku) nebo deformujeme, pak předmětová vlna se proti vlně rekonstruované změní.

Složení těchto vln vznikne interferenční pole, jehož intenzita bude proměnná. Je to důsledek toho, že amplitudy výsledné vlny jsou střídavě modulovány maximy a minimy. Záznam interferenčního pole, tj. záznam rozložení intenzity výsledné vlny v určité rovině (zde v rovině hologramu) se nazývá **holografický interferogram**. Interference předmětové vlny a rekonstruovanou vlnou ilustrují Obr. 6.8 a, b.



Obr. 6.8

Na těchto obrázcích  $p$  představuje povrch předmětu v okamžiku, kdy byl exponován hologram,  $p_1$  povrch téhož předmětu, ale posunutého. Během holografické interferometrie se nesmí měnit struktura povrchu předmětu, takže ke každému bodu (rozptylové plošce)  $A, B, C, \dots$  na povrchu  $p$  lze nalézt odpovídající bod  $A_1, B_1, C_1, \dots$  na povrchu  $p_1$ . Oba povrchy jsou osvětleny z téhož bodového zdroje světla  $S$  a každý bod povrchu se stává sekundárním světelným zdrojem. Vzdálenosti odpovídajících si bodů jsou posuvy příslušného bodu, např.  $\vec{u}_A, \vec{u}_B, \vec{u}_C, \dots$ . V libovolném bodě  $P$  prostoru interferují vlny z jednotlivých dvojic bodů

$(AA_1), (BB_1), \dots$ , reprezentované příslušnými paprsky  $\vec{AP}, \vec{A_1P}$ . Teorie interference dokazuje, že výsledná amplituda, která je úměrná intenzitě světelného pole, závisí na rozdílu fází jednotlivých interferujících paprsků, které jsou zase úměrné rozdílu optických drah (dráhovému rozdílu):  $\delta = \vec{SA_1P} - \vec{SAP}$ .

Dráhový rozdíl  $\delta$  lze vyjádřit jako  $s$ -násobek vlnové délky světla  $\lambda$  vztahem:

$$\delta = s\lambda \quad (6.3)$$

kde reálné číslo  $S$  je tzv. **řád interference** (interferenční řád), přičemž platí:

- je-li řád interference roven celému číslu, je výsledná amplituda v bodě  $P$  maximální a rovna součtu amplitud, obou paprsků,
- je-li roven lichému násobku jedné poloviny (poločíslný), amplitudy se odečítají.

Místa maximálních a minimálních amplitud (intenzit světla) se po tzv. **lokalizaci** (viz další text) projeví jako světlé a tmavé pruhy různého tvaru, tzv. **interferenční pruhy**. Tento pojem lze po zavedení pojmu řád interference vymežit takto:

Interferenční pruh je geometrickým místem bodů v rovině pozorování, které mají stejnou hodnotu rádu interference.

Uvážíme-li, že posuvy  $\vec{u}_A, \vec{u}_B$  bodů  $A, B$  jsou velmi malé jak vzhledem ke vzdálenosti světelného zdroje  $S$ , tak i vzhledem k bodu  $P$  interferenčního pole v němž zaznamenáváme

intenzitu, pak paprsky přicházející např. do bodu A, A<sub>1</sub>, lze považovat za rovnoběžné, což platí i pro paprsky z tohoto bodu vycházející Směr jednotlivých paprsku v souladu s Obr.

6.8b, je určen jednotkovými vektory  $\vec{i}_S, \vec{i}_P$ . Pak rozdíl drah paprsků  $\delta = \vec{SA}_1P - \vec{SAP}$  lze vyjádřit takto:

$$\delta = (u_A)_S + (u_A)_P = \vec{u}_A \vec{i}_S + \vec{u}_A \vec{i}_P = u_A \cos(180^\circ - \alpha) + u_A \cos \beta = -u_A \cos \alpha + u_A \cos \beta$$

**Jelikož nás zajímá součet délek  $(u_A)_S, (u_A)_P$  a nikoliv jejich rozdíl z předcházejícího vztahu, je nutné psát:**

$$\delta = |\vec{u}_A \vec{i}_S| + \vec{u}_A \vec{i}_P = -\vec{u}_A \vec{i}_S + \vec{u}_A \vec{i}_P = (\vec{i}_P - \vec{i}_S) \vec{u}_A$$

S využitím vztahu (2.70) pak obdržíme:

$$s\lambda = (\vec{i}_P - \vec{i}_S) \vec{u}_A \quad (6.4)$$

Z této rovnice, která popisuje rozložení interferenčních pruhů, vyplývá toto důležité konstatování:

**rozložení interferenčních pruhů závisí na velikosti posuvu  $\vec{u}$ , na směru osvětlení (vektor  $\vec{i}_S$ ) a na směru pozorování (vektor  $\vec{i}_P$ ).**

Jelikož neexistuje experimentální metoda, která by umožnila s holografických obrazců vyclonit právě jednu dvojici odpovídajících si bodů (např. A, A<sub>1</sub>, Obr. 6.8), interferuje v libovolném bodě P velký počet dvojic rovnoběžných paprsků. Fázový posuv mezi paprsky téže dvojice označme  $\Delta\varphi$ . Protože rozptylující body na povrchu předmětu jsou rozmístěny náhodně, je náhodná i fáze  $\varphi$  paprsků dospívajících z těchto bodů do bodu P. Abychom objasnili problematiku, vyberme z povrchu předmětu pouze dvě dvojice bodů A, A<sub>1</sub> a B, B<sub>1</sub> (Obr. 6.8) a předpokládejme, že amplitudy všech čtyř paprsků v bodě P jsou stejné. Komplexní amplituda v bodě P je dána vztahem:

$$U \sim \{ \exp(i\varphi_A) + \exp[i(\varphi_A + \Delta\varphi_A)] \} + \{ \exp(i\varphi_B) + \exp[i(\varphi_B + \Delta\varphi_B)] \} \quad (6.5)$$

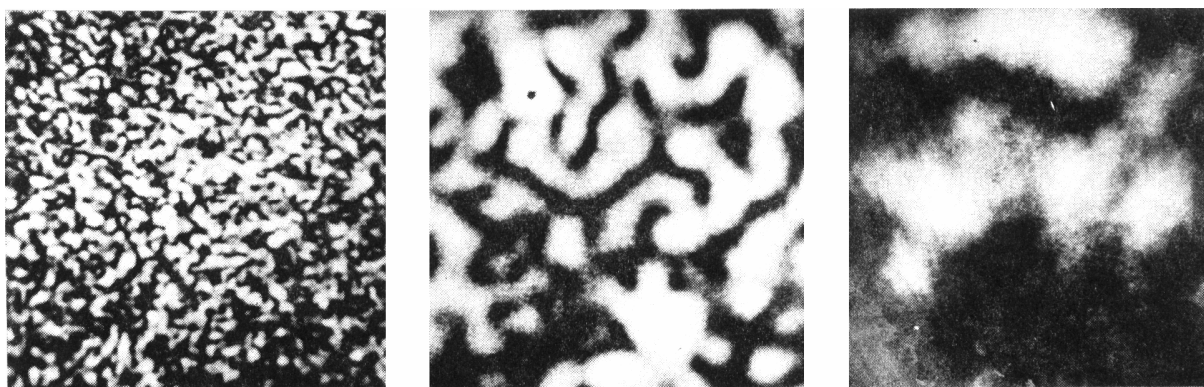
Intenzita interferenčního pole v bodě P je úměrná součinu  $UU^*$ , kde  $U$  je komplexní amplituda a  $U^*$  funkce komplexně sdružená k  $U$ , přičemž s využitím pravidel pro násobení komplexních čísel dostaneme:

$$I \sim UU^* = 2(I \cos \Delta\varphi_A) + 2(I + \cos \Delta\varphi_B) + \begin{array}{l} \text{Výsledné intenzity od jednotlivých} \\ \text{paprsků A a A}_1, \text{ B a B}_1 \end{array} \\ + 2 \cos(\varphi_A - \varphi_B) + 2 \cos(\varphi_A - \varphi_B + \Delta\varphi_A - \Delta\varphi_B) \quad \begin{array}{l} \text{Výsledek vzájemné interference bodů} \\ \text{A, B, ..., tzv. „křížové součiny“} \end{array} \\ + 2 \cos(\varphi_A - \varphi_B - \Delta\varphi_B) + 2 \cos(\varphi_A - \varphi_B + \Delta\varphi_A) \end{array}$$

Při velkém počtu tu dvojic (A, A<sub>1</sub>, B, B<sub>1</sub>,...), kdy interferují předmětové vlny z celého nebo z velké části holografického obrazu, je součet výsledků „křížových součinů“ náhodná veličina. Důsledkem je, že rozložení intenzity je charakterizováno drobnými skvrnkami, tzv. **koherenční zrnitostí** (speckle effect). Tato skvrnitá struktura je typická pro koherentní světlo a je:

- nežádoucí u holografické interferometrie, protože snižuje kvalitu holografických interferogramů,
- využívána při určování posuvů bodů předmětu u tzv. **metody laserových skvrnek (Laser Speckle)**.

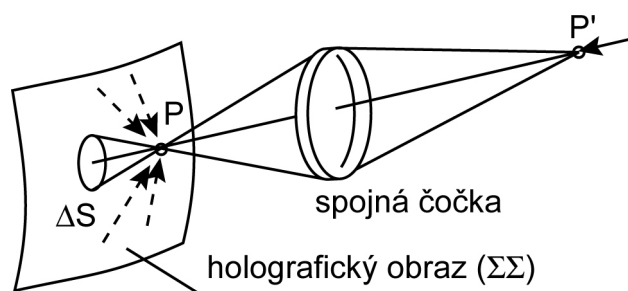
Ukázka koherenční zrnitosti v různých zvětšeních je na **Obr. 6.9**.



Obr. 6.9

Pro zaznamenání interferenčních pruhů je nutné použít vhodnou optickou zobrazovací soustavu, např. tenkou spojnou čočku, Obr. 6.10.

Tato soustava vytváří nové světelné pole v okolí určitého bodu P v prostoru, v němž jsou viditelné interferenční pruhy a mají maximální kontrast. Je tomu tak proto, že soustava vybírá z holografického obrazce jen velmi malou část (plošku  $\Delta S$  na Obr. 6.10) v níž lze očekávat, že fázové rozdíly všech dvojic rovnoběžných paprsků přicházejících do okolí bodu P s různých bodů plošky  $\Delta S$  jsou stejné. Jinými slovy, zatímco v bodě P původního světelného pole interferovaly paprsky vycházející z celého povrchu S holografického obrazce, v bodě P interferují pouze ty paprsky, které vycházejí z plošky  $\Delta S$  a jejichž variace fázového rozdílu je nulová. Tomuto způsobu zobrazení interferenčních pruhů v určité oblasti prostoru se říká **lokalizace interferenčního obrazce**.



Obr. 6.10

#### 6.4 Členění metod holografické interferometrie

Podle časového vztahu záznamu interferogramu a studované změny objektu se holografická interferometrie tradičně dělí do těchto tří velkých skupin:

**a) Interferometrie v reálném čase.** Hologram objektu je zhotoven pouze pro nezatížený objekt, který zůstává trvale v optické soustavě. Po vyvolání hologramu a jeho umístění do místa kde byl pořízen, objeví se rekonstruovaný obraz přesně v místě původního objektu. Pokud se objekt nezměnil (nedeformoval od silového, deformačního, teplotního zatížení), obraz i objekt splývají a interferenční jevy nenastávají. V opačném případě obě vlnová pole nejsou shodná a na hologramu vzniknou tmavé interferenční pruhy v místech, kde se vlivem deformace objektu vlnoplochy nezatíženého a zatíženého objektu scházejí s konstantním dráhovým rozdílem  $0, \pm\lambda, \pm 2\lambda$  atd. Pohledem přes hologram lze v reálném čase sledovat jak probíhá změna chování objektu vlivem zatěžování. Pruhy se objevují postupně, se vzrůstajícím zatížením jejich hustota stoupá, což se označuje jako „živé pruhy“. S metodou jsou spojeny zejména tyto problémy:

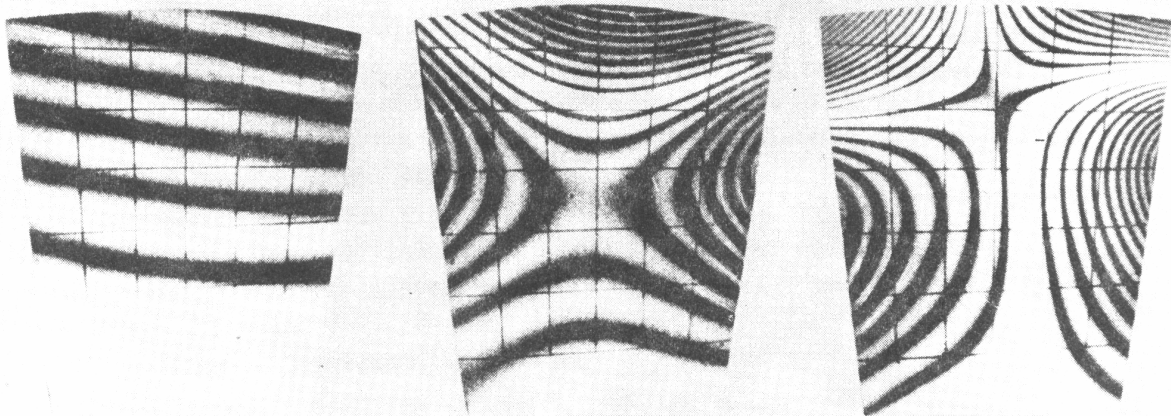
- zachování stability optické soustavy,

- požadavek nulové smrštivosti záznamového materiálu během zpracování hologramu,
- nutnost umístit hologram po zpracování zpět do soustavy s přesností odpovídající rozměrům vlnové délky světla.

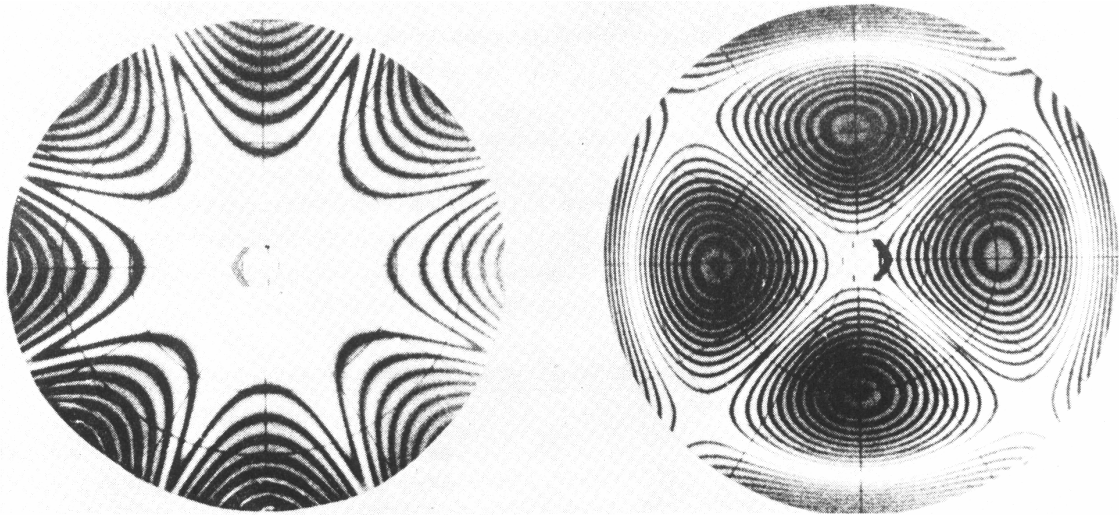
**b) Dvouexpoziční interferometrie.** Tato metoda je experimentálně snazší, protože na tutéž holografickou desku se postupně zaznamenají oba stavy objektu - před a po jeho zatížení a teprve pak se deska vyvolá. Při rekonstrukci hologramu interferují předmětové vlny vyslané v obou stavech a vznikne interferenční obrazec, jehož vlastnosti již byly diskutovány. Interferenční pruhy jsou závislé pouze na změně, která nastala mezi dvěma expozicemi, záznam je trvalý a pruhy jsou označovány jako "zmrazené pruhy". U této metody působí problémy zatěžování, které musí být provedeno tak, aby se model neposunul ani nenatočil. Má-li hologram zůstat přehledný, mohou se studovat jen velmi malé deformace. Metoda se využívá např. ke studiu šíření napěťových vln v objektech při rázových zatíženích, kdy se používá pulsní laser.

**c) Metoda časového průměru (Time-Average Holography),** označovaná jako metoda střední časové hodnoty. Používá se ke studiu kmitání objektů s difuzně odrazivými povrchy. Jestliže objekt, který vyšetřujeme, vykonává během expoziční doby harmonický nebo jiný pohyb, zaznamenávají se na hologram postupně předmětové vlny vyslané předmětem ve všech jeho polohách (časová integrace vln). Při rekonstrukci hologramu se obnoví všechny předmětové vlny současně a vytvoří se tzv. střední časová hodnota předmětové vlny. Není-li amplituda kmitů větší než několik desítek vlnových délek užitého světla, lze současně s holografickým obrazem sledovat i soustavu interferenčních pruhů, které souvisejí s amplitudou kmitů, přičemž některé pruhy mohou být přímo uzlovými čarami (nulové posuvy).

Pro ilustraci jsou na Obr. 6.11 znázorněny interferenční pruhy kmitající lopatky axiálního kompresoru. Na Obr. 6.11a je tvar pruhů při prvním ohybovém tvaru, na Obr. 6.11b pro druhý ohybový tvar a na Obr. 6.11c pro první torzní tvar. Na Obr. 6.12 jsou interferenční pruhy u kmitající kruhové desky.



Obr. 6.11



Obr. 6.12

### 6.5 Určování posuvů z holografických interferogramů

Pro určování složek  $u$ ,  $v$ ,  $w$  posuvu bodu povrchu vyšetřovaného objektu je v současnosti rozpracována řada metod. Zde pro ilustraci uvádíme stručnou charakteristiku čtyř základních metod.

#### 6.5.1 Určení posuvů z interferenčního řádu pruhu

Tato metoda vychází ze vztahu (6.4) mezi řádem interferenčního pruhu a posunutím v určitém bodě holografického obrazu:

$$s\lambda = (\vec{i}_p - \vec{i}_s) \cdot \vec{u}_A$$

Vektor  $(\vec{i}_p - \vec{i}_s)$  má směr osy úhlu dopadajícího a odraženého paprsku (Obr. 6.13) a velikost

$2 \cos \frac{\alpha}{2}$ . Vztah (6.4) je možno psát ve tvaru:

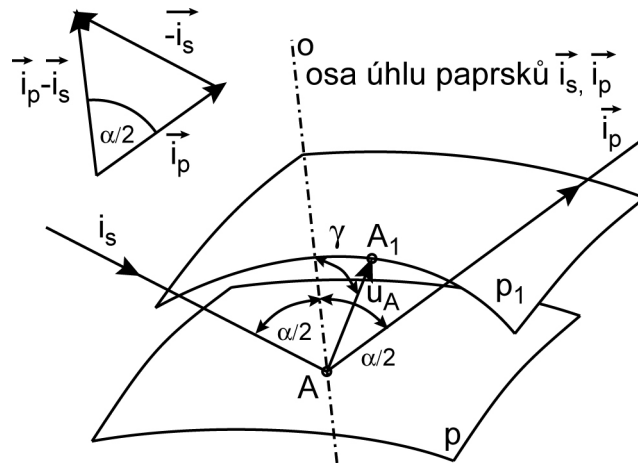
$$s\lambda = u_A 2 \cos \frac{\alpha}{2} \cos \gamma \rightarrow s = k_\alpha u_A \cos \gamma \quad (6.6)$$

kde: 
$$k_\alpha = \frac{2 \cos \frac{\alpha}{2}}{\lambda}$$

a interpretovat takto :

řád interference je úměrný průmětu posuvu do osy úhlu sevřeného směrem osvětlení a směrem pozorování.





Obr. 6.13

Konstanta úměrnosti  $k_\alpha$  udává citlivost zvoleného uspořádání. Je největší pro  $\alpha = 0$ , tj. jsou-li směry osvětlení a pozorování totožné.

Jestliže se každému světlemu interferenčního pruhu podaří přiřadit příslušný řád interference  $s$ , lze ze vztahu (6.6) vypočítat jednu složku vektoru posuvu  $u_A \cos \gamma$ . K určení tří složek  $u$ ,  $v$ ,  $w$  jsou nutné tři vhodně umístěné hologramy.

Zhodnocení metody: zhotovení tří hologramů je náročné. Přiřazení řádu interference může být nesnadné. Tento požadavek není nutný, jestliže se na povrchu tělesa určuje pouze rozdíl posuvu bodů, který může být určen z počtu interferenčních pruhů mezi uvažovanými body.

### 6.5.2 Určení posuvů počítáním interferenčních pruhů při změně směru pozorování

Metoda vychází ze skutečnosti, že při změně směru pozorování se mění poloha interferenčních pruhů vzhledem k holografickému obrazu a libovolně zvoleným bodem v rovině obrazu procházejí interferenční proužky. Počet proužků prošlých tímto bodem je roven změně řádu interference popsané vztahem:

$$s_{kl} = s_l - s_k = \frac{l}{\lambda} u_A (\vec{i}_{Pl} - \vec{i}_{Pk}) \quad (6.7)$$

kde  $s_k$  ( $s_l$ ) je řád interference při pozorování bodů  $A$ ,  $A_1$  ze směru určeného jednotkovým vektorem  $\vec{i}_{Pk}$  ( $\vec{i}_{Pl}$ ).

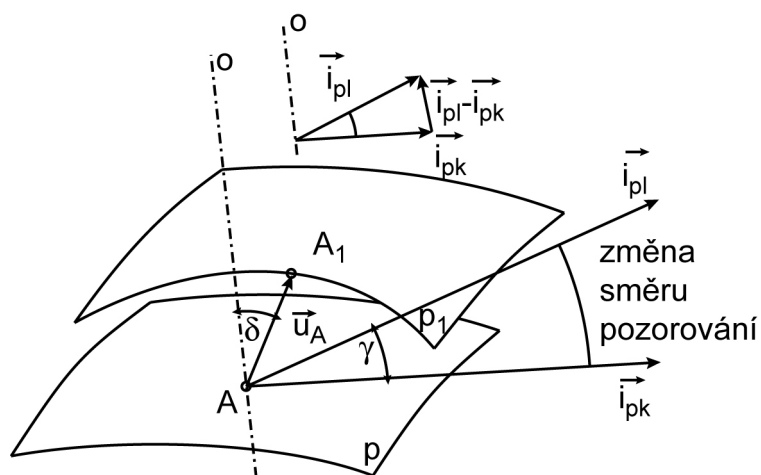
Vektor  $(\vec{i}_{Pl} - \vec{i}_{Pk})$  má směr osy  $\sigma$  tupého úhlu, který spolu svírají počáteční a konečný směr pozorování a má velikost  $2 \sin \frac{\gamma}{2}$ .

Vztah (6.7) lze psát takto:

$$s_{kl} \lambda = u_A 2 \sin \frac{\gamma}{2} \cos \delta \quad (6.8)$$

a interpretovat takto:

Změna řádu interference  $s_{kl}$ , je úměrná průmětu vektoru posuvu  $\vec{u}_A$  do směru osy  $\sigma$ , určené úhlem  $\delta$  a závisí na úhlu  $\gamma$ , sevřeném počátečním a konečným směrem pozorování.



Obr. 6.14

Pro určení složek  $u$ ,  $v$ ,  $w$  posuvu  $u_A$  musíme mít k dispozici alespoň tři nezávislé rovnice (6.8), takže musíme určit nejméně třikrát změnu řádu interference  $s_{kl}$  pro každý vyšetřovaný bod předmětu při třech různých změnách směru pozorování. Změna interferenčního řádu může být stanovena:

- vizuálně - počítáním pruhů prošlých zvoleným bodem,
- porovnáním fotografických záznamů,
- fotoelektrickou registrací v automatizovaném systému pro vyhodnocování hologramů.

Metoda je vhodná k určení složek posuvu rovnoběžných s povrchem předmětu, přesnost určení složky kolmé je velmi nízká.

### 6.5.3 Metoda filtrace v rovině holografického obrazu

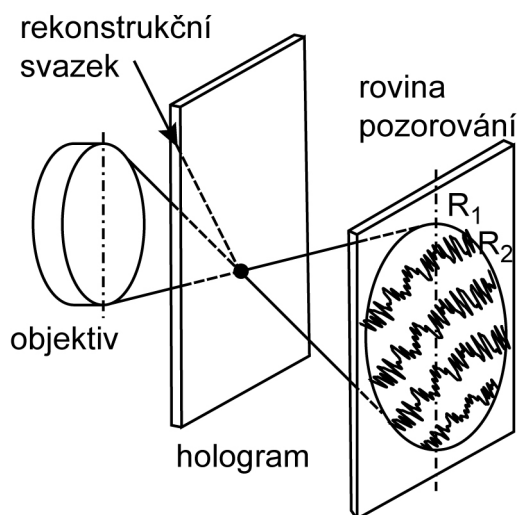
Filtrace rekonstruované vlny se provádí tak, že při rekonstrukci se použije úzký svazek paprsků osvětlující jen malou plošku hologramu, Obr. 6.15. Může to být nerozšířený laserový svazek s velkou intenzitou. Metoda umožňuje stanovit všechny tři složky  $u$ ,  $v$ ,  $w$  posuvu z jednoho hologramu.

### 6.5.4 Určení posuvu z lokalizace interferenčního obrazce

Složky posuvu se určují ze vzdálenosti mezi místem lokalizace interferenčních pruhů a holografickým obrazem předmětu. V případě translace předmětu v rovině  $xy$  (Obr. 6.16) složky posuvu  $u$ ,  $v$  se určí ze vztahů:

$$u = \frac{\lambda R}{T_x}, \quad v = \frac{\lambda R}{T_y} \quad (6.9)$$

kde  $T_x$ ,  $T_y$  jsou šířky proužků ve směru osy  $x$  a  $y$ . Určení roviny lokalizace je nesnadné a přesnost metody omezená.

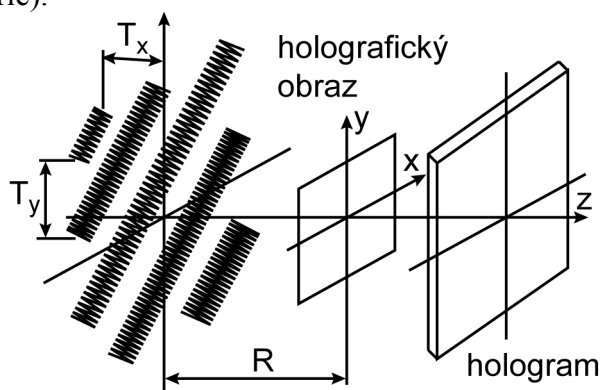


Obr. 6.15

### 6.6 Zhodnocení holografické interferometrie

Holografická interferometrie (HI) je experimentální metodou, která se rozvíjí v posledních dvou desetiletích a od svých počátků, kdy se používala zejména v laboratorních podmínkách, prošla bouřlivým vývojem a stává se značně rozšířenou metodou i v podmínkách provozních. Mezi **výhody** HI lze řadit:

- je celoplošnou metodou dávající informaci o posuvech na celém povrchu vyšetřovaného povrchu buď průběžně s působením na předmět (zatěžováním, ohříváním, ...) nebo ve dvou požadovaných okamžicích procesu působení na těleso (odpovídají HI v reálném čase a dvouexpoziční HI),
- vyšetřování předmětů libovolného tvaru s neupraveným (difuzně odrazivým) povrchem,
- malá náročnost na kvalitu optických prvků měřícího řetězce,
- citlivost metody srovnatelná s klasickou interferometrií a jinými metodami (fotoelasticimetrie).



Obr. 6.16

K **nevýhodám** patří zejména:

- požadavek na vysokou stabilitu prvků měřícího řetězce z hlediska vibrací a nežádoucích posuvů prvků (holografické jevy se odehrávají v rozměrech vlnových délek světlem),
- poměrně složitá interpretace holografických interferogramů.

K **realizaci** HI je nutno mít k dispozici:

- koherentní zdroj světla s dostatečným výkonem. Jsou to kvantové generátory světla –

lasery. Lze použít lasery rubínové ( $\lambda=692,9$  nm a  $694,3$  nm), helium-neonové ( $\lambda=633,8$ nm), a v poslední době lasery iontové, jejichž aktivním prostředím je argon a krypton (vlnovou délku lze přeladěním měnit od modré až po červenou barvu). Mají vysoký výkon a umožňují holografické zobrazování velkých předmětů krátkou expozicí, což snižuje nároky na stabilitu holografické soustavy.

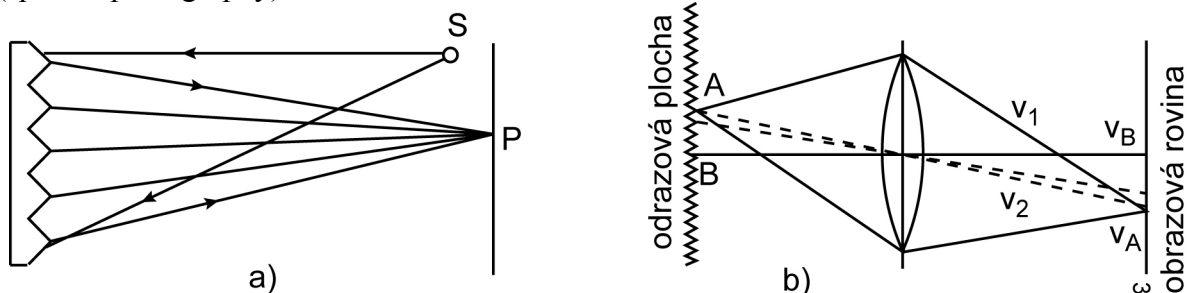
- fotografické desky s jemnozrnou emulsi, které musí mít rozlišovací schopnosti více než 2000 linek/mm, což patří ke špičkovým parametrům fotomateriálů.
- holografický stůl - slouží k upevnění opticko-mechanických prvků, vyšetřovaného a zatěžovacího zařízení. Kvalita stolu je charakterizována funkčností, statickou a dynamickou tuhostí, schopností tlumit vibrace okolí a úrovní teplotních deformací. Holografické stoly se odlévají z litiny, betonu, jsou stoly mramorové, stoly vyrobené z ocelových a gumových vrstev.

Mezi **aplikační sféry** HI v oboru mechaniky lze řadit:

- určování přetvoření a napjatosti rovinných a prostorových těles zatížených silově, deformačně a teplotně, s charakterem zatížení statickým a časově proměnným, pro monolitní i kompozitní materiály,
- určování amplitud kmitajících těles,
- vyšetřování defektů spojitosti na povrchu a uvnitř těles,
- problematiku kontaktních úloh.

## 7 Laserové skvrnky (Laser Speckle)

Koherentní laserové světlo rozptýlené na drsném povrchu má náhodné rozdělení intenzity, takže na stínítku osvětleném tímto světlem lze pozorovat charakteristickou koherenční zrnitost (skvrnkový obrazec). Stejný obrazec vzniká i při zobrazení předmětů s drsnou strukturou povrchu. Tento jev, který je při holografickém zobrazení nežádoucí a potlačuje se, má řadu významných aplikací, mezi něž patří měření změny polohy a tvaru předmětů s drsným povrchem. Jedna z metod, která toto umožňuje je tzv. skvrnková fotografická metoda (speckle photography).



Obr. 7.1

### 7.1 Vznik koherenční zrnitosti

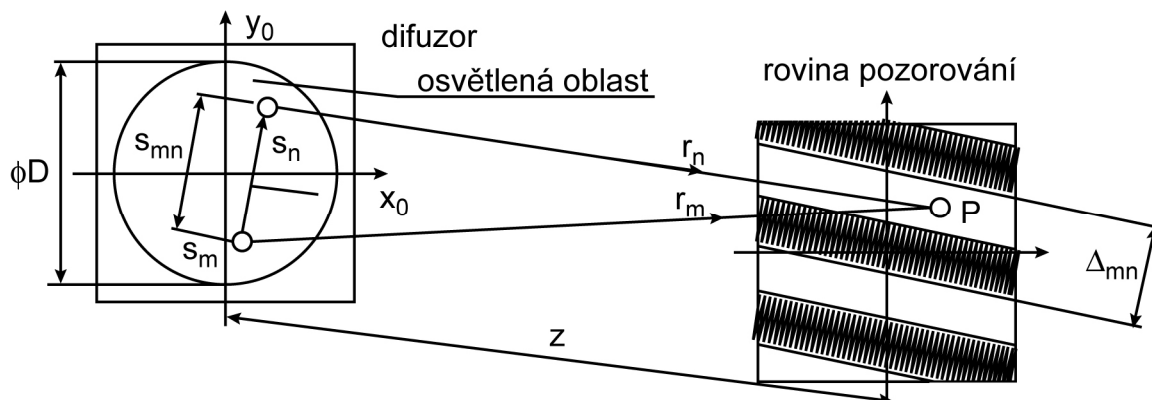
Drsný povrch, difúzně odrážející světlo, osvětlený laserovým svazkem (Obr. 7.1a) odráží velmi složitou světelnou vlnu, jejíž komplexní amplituda v libovolném bodě pozorování P je součtem velkého počtu komplexních amplitud kulových vln, přicházejících z jednotlivých mikroskopických složek povrchu. Při šíření světla volným prostorem má pak výsledná vlna v bodě P náhodnou fázi i amplitudu.

Jestliže odražené paprsky z plochy procházejí optickou soustavou (Obr. 7.1b) pak v libovolném bodě obrazové roviny  $\omega$  se skládá velký počet ohybových vln (každému bodovému zdroji  $A, B, \dots$  odpovídá ohybová vlna  $vA, vB, \dots$  Obr. 7.1b) s náhodnými fázemi. Výsledkem pak je koherenční zrnitost.

Pro další rozbory je důležitá tato skutečnost. Jestliže v rovině difúzně odrazného povrchu osvětleného laserovým světlem (osvětluje kruh  $D$ ) vybereme náhodně dva obecné body  $S_m, S_n$  (Obr. 7.2), představující elementární odrazné plošky (světelné zdroje), pak v rovině pozorování (příčměž  $z \gg D$ ) bude intenzita světla dána dvěma členy. Jeden z nich je roven střední intenzitě a druhý je tzv. interferenční člen, příslušející dvojici zdrojů  $S_m, S_n$ . Tento člen se zobrazí v rovině pozorování rovnoběžnými proužky kolnými ke spojnici zdrojů. Šířka proužku je dána vztahem:

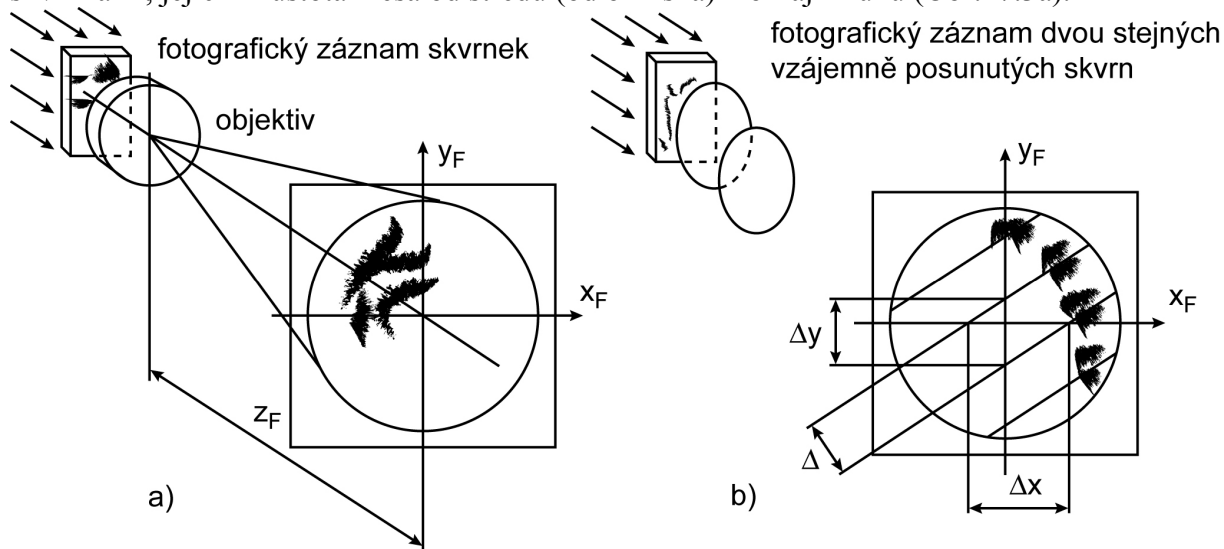
$$\Delta_{mn} = \frac{\lambda z}{s_{mn}} \quad (7.1)$$

kde  $s_{mn}$  je vzdálenost bodů  $S_m, S_n$ .



Obr. 7.2

Sečtením všech interferenčních členů, tj. složením proužkových obrazců od všech dvojic bodů  $S_i, S_j$  vzniká náhodná fluktuace intenzity  $I$ , která je charakteristická pro skvrnkový obrazec. Při aplikacích skvrnkového jevu se často používá fotografických záznamů skvrnkového obrazce. Záznamy se obvykle analyzují optickými metodami založenými na difraci světla. Dopadá-li kolimovaný svazek koherentního světla na fotografický záznam skvrnkového obrazce, pak po průchodu objektivem vzniká na stínítku umístěném v ohniskové vzdálenosti objektivu tzv. Fraunhoferův difrakční obrazec ve tvaru kruhu. Vnitřek tohoto kruhu je pokryt skvrnkami, jejichž hustota klesá od středu (od ohniska) k okraji kruhu (Obr. 7.3a).



Obr. 7.3

Z hlediska aplikací je důležitý případ, kdy na fotografické desce jsou zaznamenány dva stejné,

vzájemně posunuté skvrnkové obrazce, Obr. 7.3b, přičemž vektor posuvu  $\vec{\delta}(u, v)$  je v celé vyšetřované oblasti stejný.

Dokazuje se, že intenzita osvětlení  $I'_F$  v rovině Fraunhoferovy difrakce je dána vztahem:

$$I'_F = I_F 4 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda z_F} (x_F u + y_F v) \right] \quad (7.2)$$

Kosinový člen představuje tzv. interferenční faktor. Jeho hodnota bude maximální, jestliže argument bude roven celému  $s$ -násobku  $\pi$ , tedy:

$$\pi \left( x_F \frac{u}{\lambda z_F} + y_F \frac{v}{\lambda z_F} \right) = s\pi \rightarrow x_F \frac{u}{\lambda z_F} + y_F \frac{v}{\lambda z_F} = s \quad (7.3)$$

$$s \in (0, \pm 1, \pm 2 \dots)$$

Rovnice (7.3) představuje v souřadnicovém systému  $x_F, y_F$  úsekový tvar rovnice přímky. Pro  $s \in (0, \pm 1, \pm 2)$  se jedná o soustavu rovnoběžných přímek, které na osách  $x_F, z_F$  vymezují úseky (Obr. 7.3b):

$$\Delta_x = \frac{s \lambda z_F}{u}; \quad \Delta_y = \frac{s \lambda z_F}{v} \quad (7.4)$$

Rovnici (7.3) lze pak psát ve tvaru:

$$\frac{x_F}{\Delta_x} + \frac{y_F}{\Delta_y} = 1 \quad (7.5)$$

Vzdálenost  $l$  dvou přilehlých přímek, která je zřejmá z Obr. 7.4, lze odvodit následovně. Trojúhelníky ABC, ADC jsou podobné, takže:

$$\frac{l}{\Delta} = \frac{\Delta_y}{\Delta_x}$$

$$(\Delta_y)^2 = l^2 + \Delta^2$$

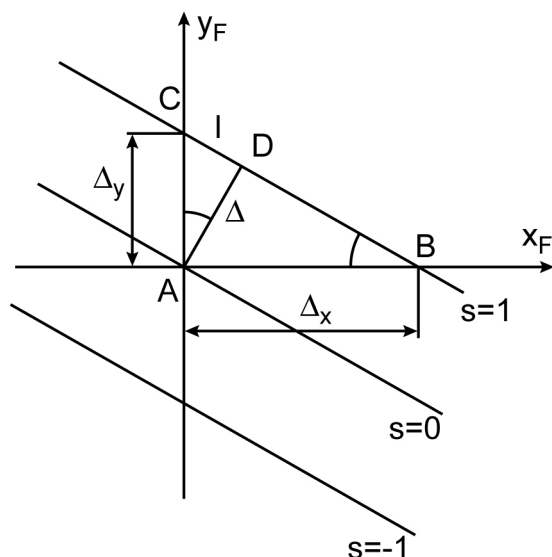
Po dosazení za  $l$  do posledního vztahu obdržíme:

$$(\Delta_y)^2 = \Delta^2 \left( \frac{\Delta_y}{\Delta_x} \right)^2 + \Delta^2 \Rightarrow \frac{l}{\Delta^2} = \frac{l}{(\Delta_x)^2} + \frac{l}{(\Delta_y)^2}$$

Dosadíme-li do získaného vztahu vztahy (7.4) pro  $\Delta_x, \Delta_y$  a použijeme-li vztah  $\delta^2 = u^2 + v^2$ , postupně dostaneme:

$$\frac{l}{\Delta^2} = \frac{u^2}{(s \lambda z_F)^2} + \frac{v^2}{(s \lambda z_F)^2} = \frac{u^2 + v^2}{(s \lambda z_F)^2} \quad (7.6)$$

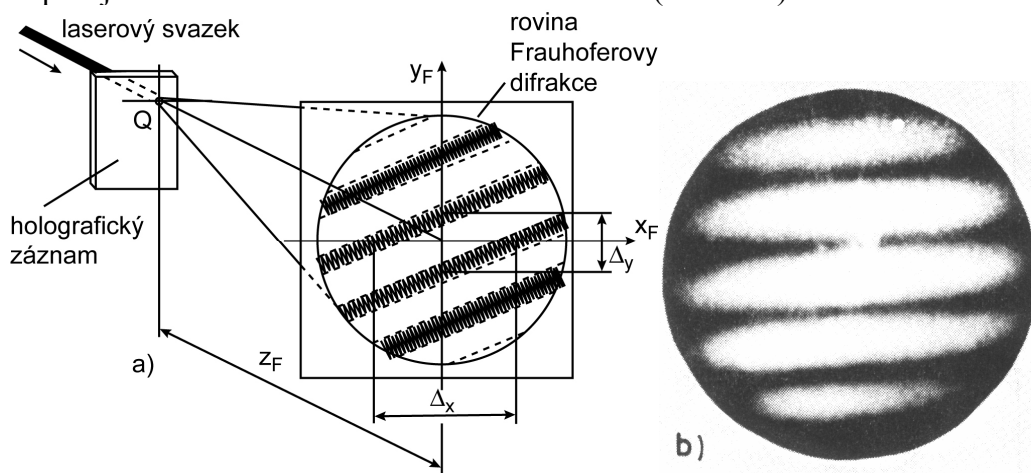
$$\Delta = \frac{s \lambda z_F}{\delta}$$



Obr. 7.4

### Skvrnková fotografická metoda pro statické úlohy

K řešení statických úloh, při nichž se srovnává výchozí stav tělesa s některým jiným stavem (zatížené, ohřáté těleso) se užívá dvojexpoziční metoda, kdy se obrazy předmětu v obou stavech postupně zaznamenají na jednu fotografickou desku. Záznam skvrnkových obrazců na této desce se pak analyzuje optickými metodami, přičemž se vychází ze skutečností uvedených v předchozím odstavci. Nejčastěji se používá analýza úzkým laserovým svazkem dopadajícím kolmo do zvoleného místa záznamu (Obr. 7.5).



Obr. 7.5

Na stínítku v rovině pozorování vzniká difrakční obrazec jaký je zobrazen na Obr. 7.5b. Jestliže laserový paprsek se upraví vhodným objektivem, pak intenzita osvětlení na stínítku dostahuje pro vizuální odečítání prostorových period a směru proužků. Analýza záznamu se obvykle provádí v určitém počtu bodů tvořících pravidelnou síť. Složky  $u$ ,  $v$  posuvu bodu Q jsou dány vztahy:

$$u = \frac{\lambda z_F}{\Delta_x}, \quad v = \frac{\lambda z_F}{\Delta_y} \quad (7.7)$$

## 7.2 Měřicí rozsah a přesnost

Abychom mohli určit posuv jak v difrakčním obrazci musí padnout na plochu osvětleného kruhu alespoň dva proužky. Nejmenší posuv  $\delta_{min}$  tedy určíme z podmínky, že poloměr kruhu  $r_f$  Fraunhoferova difrakčního obrazce je roven šířce proužku  $\Delta$ .

Šířka proužku  $\Delta$  je určena vztahem (7.6), poloměr  $r_f$  je dán vztahem:

$$r_F = \frac{z_F}{z} D$$

kde  $D$  je průměr kruhové clony objektivu při záznamu ;  
 $Z$  je obrazová vzdálenost, kterou lze určit ze zobrazovací rovnice geometrické optiky,

$$Z = f(1 - M)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost objektivu,  
 $M$  příčné zvětšení (pro spojky  $M < 0$ ).

**Pak je:**

$$r_F = \Delta \Rightarrow \frac{\lambda z_F}{\delta_{min}} = \frac{z_F}{z} D \Rightarrow \frac{\lambda}{\delta_{min}} = \frac{D}{f(1 - M)} \Rightarrow \delta_{min} = \lambda \frac{f}{D} (1 - M) \quad (7.8)$$

kde  $\frac{f}{D}$  je clonové číslo objektivu.

Např. použijeme-li objektiv s  $\frac{f}{D} = 2$ , zvětšení  $M = -1$  a jako zdroj He-Ne laser

$$\text{s } \lambda = 0,633 \mu\text{m}, \text{ dostaneme } \delta_{min} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (7.9)$$

Horní hranice rozsahu měření určená posuvem  $\delta_{max}$  závisí na střední velikosti sekundárních skvrnek v difrakčním obrazci. Proužky jsou zřetelné, je-li jejich šířka alespoň o jeden řád větší, než střední velikost  $\sigma$  skvrnek:

$$\Delta = 10\sigma \Rightarrow \frac{\lambda z_F}{\delta_{max}} = 10 \cdot 1,2 \frac{\lambda z_F}{2w} \Rightarrow \delta_{max} = 0,166 w \quad (7.10)$$

kde  $w$  je tzv. pološířka stopy laserového svazku.

Přesnost metody závisí na řadě faktorů, mezi něž řadíme:

Charakter vyšetřovaného posuvu (větší přesnost pro posuvy v rovině předmětu EO), použitou metodu optické analýzy, velikost posunutí skvrnek, způsob odečítání proužků, ...

Pozor na systematické chyby v důsledku nekontrolovaného pohybu, nebo změnu tvaru předmětu EO.



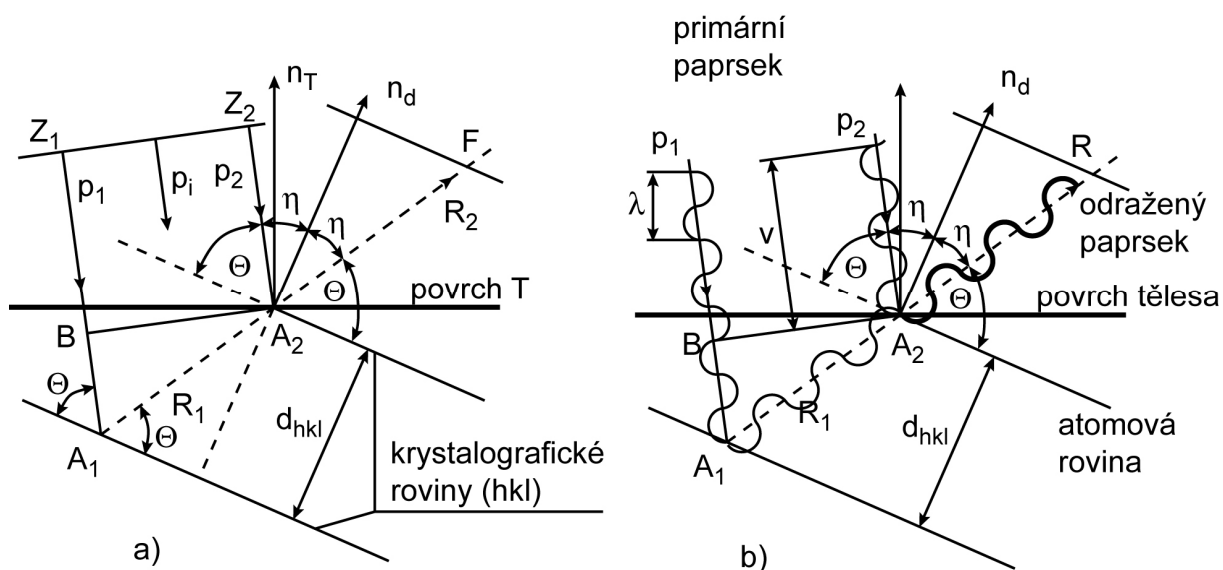
## 8 Rentgenová tenzometrie

Určování elastických napětí s využitím rentgenového záření je založeno na stejném principu jako běžné tenzometrické metody - na určování relativní změny vzdálenosti (báze) dvou vymezených geometrických útvarů na vyšetřovaném tělese způsobené jeho zatěžováním. Rentgenová tenzometrie vychází z měření změny vzdálenosti krystalografických rovin krystalické mřížky materiálu v procesu jeho zatěžování.

Mezi běžnou a rentgenovou tenzometrií existují odlišná specifika v tom, že:

- u běžných tenzometrických měření je báze tvořena vzdáleností dvou bodů na povrchu tělesa. Velikost báze je u elektrických tenzometrů od desetin do desítek milimetrů,
- u rtg. tenzometrie je báze tvořena vzdáleností krystalografických rovin (řádově  $10^{-7}$  mm), které jsou pod povrchem tělesa a svírají s normálou tečné roviny v bodě povrchu tělesa určitý úhel  $\eta$  (Obr. 8.1a).

Měřit změny vzdáleností krystalografických rovin umožňuje difrakce monochromatického rentgenového záření, dopadajícího na povrch tělesa. Krystalografická mřížka se totiž chová jako difrakční mřížka, jejíž každý uzlový bod (bod v němž si představujeme lokalizovaný atom) se dle Huygensova principu stává při dopadu záření sekundárním zdrojem vysílajícím vlnu záření. Při analýze skvrn vzniklých na filmech po průchodu rtg. záření materiálem byla z počátku vyslovena domněnka, že dochází k jevu, podobnému odrazu paprsků. Dále bylo konstatováno, že krystal se chová tak, jakoby obsahoval soubor rovin umístěných za sebou v určitých vzdálenostech. Každá z těchto rovin rozptýlí sice jen malé množství záření, ale superpozicí dílčích rozptylů od jednotlivých rovin může vzniknout intenzita záření schopná registrace. Po ozáření povrchu tělesa rtg. zářením dochází tedy k interferenci odražených vln od krystalografických atomových rovin a v závislosti na velikosti fázových posuvů těchto vln vznikají v prostoru místa maxim a minim intenzity záření. Analytickým vyjádřením této vyslovené a experimentálně ověřené hypotézy je tzv. Braggova rovnice, kterou lze odvodit z uvedeného poznatku, že difrakci rtg. paprsků na atomech lze interpretovat jako odraz paprsků krystalografickými rovinami.



Obr. 8.1

## 8.1 Odvození Braggovy rovnice

Nechť na povrch tělesa T z polykrystalického materiálu dopadá úzký svazek rovnoběžných paprsků  $P_1, P_2$ , (průměr cca 1 mm) monochromatického rtg. záření. Paprsky proniknou i pod povrch tělesa, řádové do  $10^{-2}$  mm, kde narážejí na soustavy rovnoběžných krystalografických rovin krystalických mřížek. Hledejme podmínku, která ze soustavy těchto rovin způsobí interferenci od ní odražených rtg. paprsků. Předpokládejme, že je to soustava rovin s určitými Millerovými indexy (h, k, l) a se vzdáleností těchto rovin  $d_{hkl}$ . Na tuto soustavu rovin nechť paprsky dopadnou pod úhlem  $\Theta$ , pod nímž se od těchto rovin i odrazí, (paprsky  $R_1, R_2$ , Obr. 8.1a).

Odražené paprsky budou vzájemně fázově posunuty, přičemž fázový posuv je úměrný rozdílu jejich drah. Tomuto rozdílu je úměrná i intenzita odražených paprsků (touto problematikou jsme se již zabývali v odstavci o holografické interferometrii). Intenzita odražených paprsků bude maximální, když rozdíl jednotlivých paprsků buď roven celým násobkům, tedy  $n \in (1, 2, 3, \dots)$ , vlnová délky  $\lambda$  dopadajícího rtg. záření. V souladu s Obr. 8.1a to bude tehdy, když pro rozdíl drah paprsků po odrazu bude platit  $\delta = n\lambda$ , tedy:

$$\delta = Z_1 A_1 F - Z_2 A_2 F = \vec{A}_2 A_1 + \vec{A}_1 B = n\lambda$$

kde 
$$\vec{A}_2 A_1 = \frac{d_{hkl}}{\sin \Theta}; \quad \vec{A}_1 B = \vec{A}_2 A_1 \cos(180^\circ - 2\Theta)$$

Po dosazení je:

$$\frac{d_{hkl}}{\sin \Theta} [1 + \cos(180^\circ - 2\Theta)] = n\lambda \rightarrow \frac{d_{hkl}}{\sin \Theta} (1 - \cos 2\Theta) = n\lambda \rightarrow \frac{d_{hkl}}{\sin \Theta} 2 \sin^2 \Theta = n\lambda$$

Konečný tvar je: 
$$2d_{hkl} \sin \Theta = n\lambda \quad (8.1)$$

Obdrželi jsme tzv. **Braggovu rovnici**, v níž  $n$  je **řád reflexe**,  $\Theta$  je **Braggův úhel**. Grafická interpretace odvozené rovnice je na Obr. 8.1b. Odvozená rovnice umožňuje vyslovit toto konstatování:

Dopadá-li na povrch polykrystalického materiálu kolimovaný svazek monochromatických rentgenových paprsků s vlnovou délkou  $\lambda$ , pak reflexe odražených paprsků nastane pouze na těch soustavách krystalografických rovin, které splňují Braggovu rovnici (8.1).

Ilustrativně je tato skutečnost znázorněna na Obr. 8.2a, na němž jsou v řezu tělesa rovinou obsahující normálu k povrchu tělesa v bodě B znázorněny ty krystalky, na nichž nastává reflexe. To, že se interference zúčastňují jen některá krystalky, je označováno jako selekce krystalů a rentgenová tenzometrie jako **selektivní metoda**. U většiny materiálů jsou krystaly na nichž nastává reflexe rozděleny kolem ozařované plošky B rovnoměrně, takže paprsky po odrazu od krystalografických rovin vytvářejí tzv. **kužel difraktovaného záření (difrakční kužel)** s vrcholovým, tzv. **difrakčním úhlem**  $4\eta$ , Obr. 8.2b. Osou tohoto kužele je primární paprsek P. Úhel  $\eta$  je s Braggovým úhlem  $\Theta$  vázán vztahem:

$$\Theta = 90^\circ - \eta.$$

Jestliže do roviny kolmé k primárnímu paprsku umístíme citlivý film, pak difrakční kužel vytvoří na filmu **interferenční obrazec** ve tvaru kružnice (difrakční). Záznam interferenčního obrazce na filmu se nazývá **rentgenogram**. Tento postup záznamu interference se označuje jako **metoda zpětného odrazu s rovinnou kazetou**. Jsou rozpracovány i metody s kuželovou a kulovou kazetou, resp. jejich kombinace.

Braggova rovnice umožňuje při známé hodnotě vlnové délky rtg. záření a při ex-



kde směrové kosiny v souladu s Obr. 8.3a lze vyjádřit takto:

$$\alpha_1 = \sin \psi \cos \varphi, \quad \alpha_2 = \sin \psi \sin \varphi, \quad \alpha_3 = \cos \psi$$

Po dosazení do předchozí rovnice máme:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = (\varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi \quad (8.4)$$

Za předpokladu, že povrch tělesa v okolí vyšetřovaného bodu B je nezatížený a v důsledku skutečnosti, že hloubka pronikání rtg. paprsků je velmi malá (reflektují tedy jen roviny těsně pod povrchem), lze napjatost v bodě B modelovat jako rovinnou. Necht'  $\sigma_3 = 0$ . Konstitutivní vztahy pro Hookovský materiál pak mají tvar:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2), \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu\sigma_1), \quad \varepsilon_3 = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

Jestliže je dosadíme do vztahu (8.4) a použijeme-li při úpravě vztah  $\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi$ , po jednoduchých úpravách dostaneme:

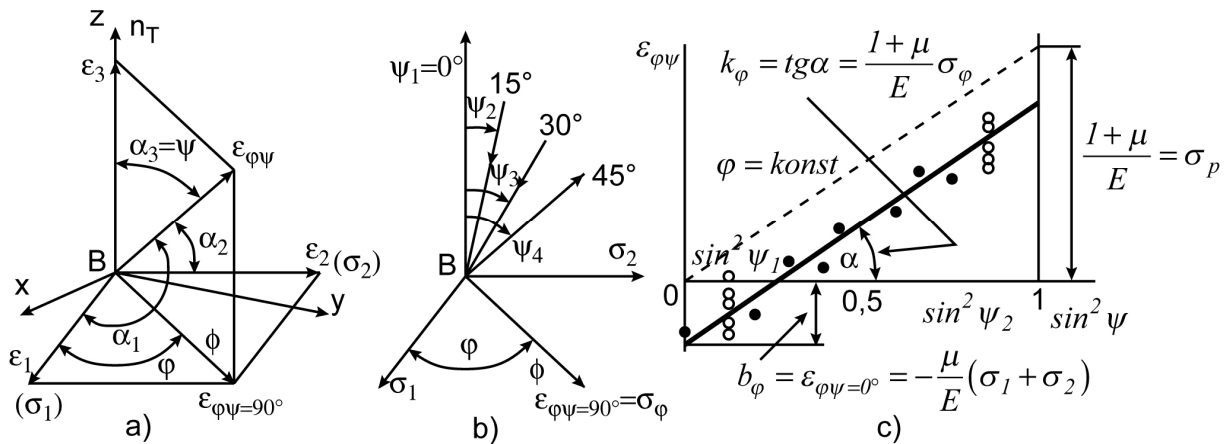
$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+\mu}{E}(\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (8.5)$$

Výraz v první závorce vyjadřuje však napětí  $\sigma_\varphi$  v rovině povrchu tělesa ve směru určeném úhlem  $\varphi$ , tedy:

$$\sigma_{\varphi\psi=90^\circ} = \sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi \quad (8.6)$$

takže vztah (8.5) lze přepsat do tohoto jednoduchého tvaru:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_\varphi \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (8.7)$$



Obr. 8.3

Z porovnání vztahů (8.3) a (8.7) vidíme, že vztah (8.7) vlastně vyjadřuje přetvoření vzdálenosti krystalografických rovin v závislosti na úhlu  $\psi$  dopadu paprsku rtg. záření při parametru  $\varphi$ , což je úhel, který svírá rovina  $\phi$  obsahující normálu  $\vec{n}_T$  se směrem hlavního přetvoření  $\varepsilon_1$  (tím i napětí  $\sigma_1$ ), Obr. 8.3a.

V souřadnicovém systému  $(\varepsilon_{\varphi\psi}, \sin^2 \psi)$  představuje vztah (8.7) rovnici přímky

$\varepsilon_{\varphi\psi} = k_\varphi \sin^2 \psi + b_\varphi$  s těmito parametry (Obr. 8.3c) :

$$\text{směrnice přímky:} \quad k_\varphi = \frac{1+\mu}{E} \sigma_\varphi \quad (8.8)$$

úsekem  $b_\varphi$  na ose  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  ( $\sin^2 \psi = 0 \rightarrow \psi = 0^\circ$ ):

daným vztahem:

$$\varepsilon_{\varphi\psi=0} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_I + \sigma_2) \quad (8.9)$$

Lze tedy konstatovat:

- nezávisle na úhlu  $\varphi$  je deformace krystalické mřížky, určena veličinou  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ , lineárně závislá na veličině  $\sin^2 \psi$ ,
- z kolmého ozáření ( $\psi = 0^\circ$ ) - lze získat součet hlavních napětí  $\sigma_I + \sigma_2$  - ze vztahu

$$(2.104) \text{ je: } \sigma_I + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \varepsilon_{\varphi\psi=0^\circ}$$

- jestliže experimentálně určíme závislost  $\varepsilon_{\varphi\psi} = k_\varphi \sin^2 \psi + b_\varphi$ , pak známe směrnicí  $k_\varphi$  a lze určit napětí  $\sigma_\varphi$  (Obr. 8.3c), což odpovídá případu  $\psi = 0^\circ$  (ozáření ve směru povrchu tělesa, kterým nelze dosáhnout difrakce, přičemž ale  $\sigma_\varphi$  právě potřebujeme). Ze vztahu (8.7) a dle geometrie Obr. 8.3c snadno získáme vztah:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{1 + \mu} k_\varphi \quad (8.10)$$

Uvedená metoda se označuje jako „**metoda**  $\sin^2 \psi$ “. Umožňuje stanovit napětí v jednom směru povrchu tělesa. Známe-li charakter napjatosti (jednoosá, smyková), můžeme orientovat rovinu prosvětlování určenou úhlem  $\varphi$  tak, že směr  $\varphi$  je totožný se směrem nenulového hlavního napětí a obdržené napětí  $\sigma_\varphi$  je pak jedním hlavním napětím. Ve většině případů však na povrchu tělesa vzniká obecná rovinná napjatost u níž jsou hlavní směry neznámé. V tomto případě, zcela obdobně jako tomu bylo u klasických tenzometrických metod, je nutné provést více měření a z nich určit veličiny  $\sigma_I, \sigma_{II}, \varphi_0$ , které určují rovinnou napjatost. U rentgenové tenzometrie, při použití metody  $\sin^2 \psi$  se postupuje tak, že se tato metoda aplikuje pro různé hodnoty úhlu  $\varphi$ , obvykle pro obecný úhel  $\varphi$  a pro úhly  $(\varphi + 45^\circ), (\varphi + 90^\circ)$ , Obr. 8.4a. Z experimentálně určených směrnic  $k_\varphi, k_{\varphi+45^\circ}, k_{\varphi+90^\circ}$  přímek  $\varepsilon_\varphi = k_\varphi \sin^2 \psi + b_\varphi$  (Obr. 8.4b) se sestaví soustava rovnic typu (8.10):

$$\frac{E}{1 + \mu} k_\varphi = \sigma_\varphi; \quad \frac{E}{1 + \mu} k_{\varphi+45^\circ} = \sigma_{\varphi+45^\circ}; \quad \frac{E}{1 + \mu} k_{\varphi+90^\circ} = \sigma_{\varphi+90^\circ} \quad (8.11)$$

Vztahy pro  $\sigma_{\varphi+45^\circ}, \sigma_{\varphi+90^\circ}$  lze odvodit ze vztahu (8.6) pro úhly  $(\varphi + 45^\circ), (\varphi + 90^\circ)$ .

Soustava rovnic (8.11) pro určení veličin  $\sigma_I, \sigma_{II}, \varphi_0$  má pak tvar:

$$\begin{aligned} \frac{E}{1 + \mu} k_\varphi &= \sigma_I \cos^2 \varphi + \sigma_{II} \sin^2 \varphi \\ \frac{E}{1 + \mu} k_{\varphi+90^\circ} &= \sigma_I \sin^2 \varphi + \sigma_{II} \cos^2 \varphi \\ \frac{E}{1 + \mu} k_{\varphi+45^\circ} &= \frac{1}{2} \left[ \sigma_I (1 - \sin^2 \varphi) + \sigma_{II} (1 - \cos^2 \varphi) \right] \end{aligned} \quad (8.12)$$

Výsledkem řešení soustavy (8.12) je:

- uhel  $\varphi_0$  určující směr hlavního napětí  $\sigma_I$  od směru určeného úhlu  $\varphi$ , (Obr. 8.4a)

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{k_\varphi + k_{\varphi+90^\circ} - 2k_{\varphi+45^\circ}}{k_\varphi - k_{\varphi+90^\circ}} \quad (8.13)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sigma_\varphi + \sigma_{\varphi+90^\circ} - 2\sigma_{\varphi+45^\circ}}{\sigma_\varphi - \sigma_{\varphi+90^\circ}}$$

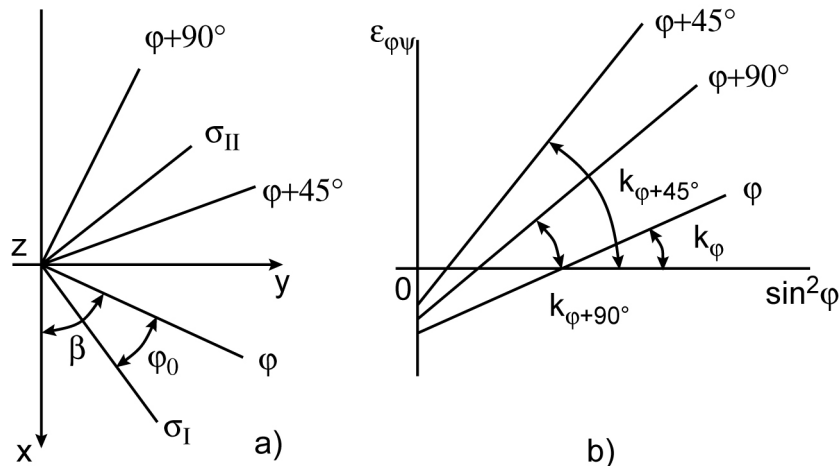
- hlavní napětí:

$$\sigma_I = \frac{E}{1+\mu} \frac{k_{\varphi+90^\circ} - k_\varphi \cotg^2 \varphi}{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi}, \sigma_{II} = \frac{E}{1+\mu} \frac{k_{\varphi+90^\circ} - k_\varphi \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (8.14)$$

resp.

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{\varphi+90^\circ} - \sigma_\varphi \cotg^2 \varphi}{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi}, \sigma_{II} = \frac{\sigma_{\varphi+90^\circ} - \sigma_\varphi \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (8.15)$$

Získaná napětí  $\sigma_I, \sigma_{II}$  se pak přiřadí napětím  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  přičemž  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Vzhledem k neuvazování napětí kolmého na povrch tělesa, je jedno s napětí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  nulové.



Obr. 8.4

### 8.3 Postup při určování napětí z rentgenografických měření

Jestliže pro určování napětí použijeme metodu  $\sin^2 \psi$ , pak pro získání lineární závislosti  $\varepsilon_{\varphi\psi} = k_\varphi \sin^2 \psi + b_\varphi$ , z níž určujeme napětí  $\sigma_\varphi$ , musíme experimentálně stanovit alespoň dvě hodnoty veličiny  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  při různých úhlech dopadu  $\psi_1, \psi_2$  primárního svazku rtg. paprsku. Dosadíme-li odpovídající veličiny  $\varepsilon_{\varphi\psi_1}, \varepsilon_{\varphi\psi_2}$ , do vztahu (8.7), dostaneme:

$$\varepsilon_{\varphi\psi_1} = \frac{1+\mu}{E} \sin^2 \psi_1 \sigma_\varphi + \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$\varepsilon_{\varphi\psi_2} = \frac{1+\mu}{E} \sin^2 \psi_2 \sigma_\varphi + \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

Jejich odečtením a řešením vzhledem k  $\sigma_\varphi$  máme:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{1+\mu} \frac{\varepsilon_{\varphi\psi_2} - \varepsilon_{\varphi\psi_1}}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad (8.16)$$

Měření při uhlech  $\psi_1, \psi_2$  je vhodné statisticky významně n-krát opakovat a určit

střední hodnoty  $\bar{\varepsilon}_{\varphi\psi_1}, \bar{\varepsilon}_{\varphi\psi_2}$  (bílé body měření na Obr. 8.3c).

Poznámka k charakteru měřená napjatosti: jestliže rentgenografické měření používáme k určování napětí v procesu zatěžování od nezatíženého stavu, pak je možno stanovit vzdálenost  $d_0$  krystalografických rovin pro nezatížený stav při tzv. kolmém ozáření ( $\psi = 0^\circ$ ).

Poměrné přetvoření je pak dáno vztahem  $\varepsilon = \frac{d_{\psi z} - d_0}{d_0}$ , kde  $d_{\psi z}$  je vzdálenost krystalografických rovin pro zatížený stav a úhel  $\psi$ .

Jestliže vyšetřujeme zbytková napětí, pak neexistuje nezatížený stav a místo dvou stavů napětí (zatížený a nezatížený stav) vyšetřujeme přetvoření  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  ve dvou různých směrech  $\psi_1, \psi_2$ , přičemž jeden z nich je obvykle směr  $\psi = 0^\circ$  (kolmé ozáření).

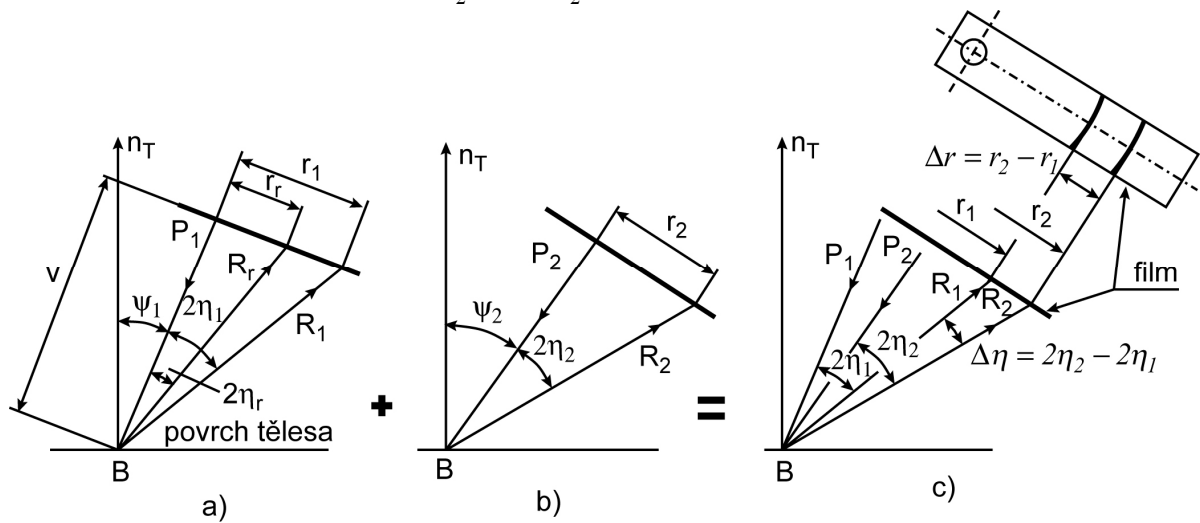
Tento postup je možno použít i pro určování napětí v procesu zatěžování, aniž bychom měřili při nulovém zatížení. Zavedeme-li vedle veličin  $d_0, d_{\varphi z}$  veličinu  $d_{0z}$  pro zatížený stav při kolmém ozáření, pak pro rozdíl přetvoření ve vztahu (8.16) platí:

$$\varepsilon_{\varphi\psi_2} - \varepsilon_{\varphi\psi_1} = \frac{d_{\psi,z} - d_0}{d_0} - \frac{d_{0,z} - d_0}{d_0} = \frac{d_{\psi,z} - d_{0,z}}{d_0}$$

Výsledek se prakticky nezmění, jestliže místo  $d_0$  dosadíme  $d_z$ .

Pak je:

$$\varepsilon_{\varphi\psi_2} - \varepsilon_{\varphi\psi_1} = \frac{d_{\psi} - d_z}{d_z} = \frac{\Delta d}{d_z} \quad (8.17)$$



Obr. 8.5

Registraci rentgenografických měření pro určování napjatosti lze provádět:

- fotograficky, a to v uspořádání Debeyovy-Scherrerovy metody zpětného odrazu,
- rentgenovým goniometrem, tj. registrací difraktovaného záření Geigerovým - Mullerovým, nebo scintilačním, resp. proporcionálním počítačem záření.

### Postup při určování $\sigma_\varphi$ ze vztahu (8.16) metodou zpětného odrazu.

Nechť při ozařování povrchu tělesa pod úhlem  $\psi_1$  má difrakční kužel vrcholový úhel  $4\eta_1$  a Obr. 8.5a. Průnikem tohoto kužele s rovinou filmu, vzdálenou od povrchu tělesa o vzdálenost  $v$  je difrakční kružnice s poloměrem  $r_1$ . Při ozařování pod úhlem  $\psi_2$  analogické veličiny necht' jsou  $2\eta_2, r_2$ , Obr. 8.5b. Známe-li vzdálenost  $v$  a poloměry  $r_1, r_2$  lze ze vztahů

$tg\,2\eta_1 = r_1/v$ ;  $tg\,2\eta_2 = r_2/v$  určit úhly  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ . Přesné zjištění vzdálenosti  $v$  je možné provést:

- buď nastavením vzdálenosti pomocí dutinového mikrometru nebo jiné měřky,
- resp. tak, že na povrch tělesa nanese se indikační prášek (referenční kov), jehož difrakční úhel  $2\eta_r$  pro použitou vlnovou délku  $\lambda$  rtg. záření známe (zlato, stříbro) Obr. 8.5a.

Jestliže poloměr difrakční kružnice referenčního kovu je  $r_r$ , pak vzdálenost  $v$  je dána vztahem  $v = \frac{r_r}{tg\,2\eta_r}$ . S použitím vztahů pro  $tg\,2\eta_1$ ,  $tg\,2\eta_2$  pak platí:

$$tg\,2\eta_1 = \frac{r_1}{r_r} tg\,2\eta_r, \quad tg\,2\eta_2 = \frac{r_2}{r_r} tg\,2\eta_r \quad (8.18)$$

Nyní ukážeme, jak rozdíl přetvoření  $(\varepsilon_{\varphi_1\psi_2} - \varepsilon_{\varphi_1\psi_1})$  ve vztahu (2.111) souvisí s rozdílem uhlů  $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$  a s rozdílem  $\Delta r = r_2 - r_1$  poloměrů difrakčních kružnic, které lze měřit na rentgenogramu.

Jelikož platí vztah  $\Theta_i = 90^\circ - \eta_i$ , je  $\Theta_2 - \Theta_1 = -(\eta_2 - \eta_1)$  a vztah (8.3) lze vyjádřit takto :

$$\begin{aligned} \varepsilon_d &= -cotg\,\Theta_2 \cdot (\Theta_2 - \Theta_1) = -cotg(90^\circ - \eta_2) \cdot [-(\eta_2 - \eta_1)] = \\ &= tg\,\eta_2 (\eta_2 - \eta_1) \Rightarrow \varepsilon_d = tg\,\eta_2 \cdot (\Delta\eta) \end{aligned}$$

V souladu se vztahy (8.3) a (8.17) pak je:

$$\varepsilon_{\varphi\psi_2} - \varepsilon_{\varphi\psi_1} = tg\,\eta_2 \cdot (\Delta\eta) \quad (8.19)$$

Protože z rentgenogramu se lépe odečítá rozdíl  $\Delta r$  než určuje rozdíl  $\Delta\eta$ , upravme vztah (8.19) tak, aby v něm vystupovala veličina  $\Delta r$ . Diferencováním vztahu:

$$r = v\,tg\,2\eta$$

$$\text{dostaneme: } \Delta r = v \frac{2}{\cos^2 2\eta} \Delta\eta \quad (8.20)$$

Vyjádríme-li funkci  $\cos 2\eta$  pomocí  $tg\,2\eta$ , máme:  $\Delta r = 2v(1 + tg^2 2\eta)\Delta\eta$ .

Jestliže za výchozí stav považujeme měření při úhlu  $\psi_2$ , pak lze poslední vztah psát takto:

$$\Delta r = 2v(1 + tg^2 2\eta_2)\Delta\eta.$$

Dosadíme-li za  $v = \frac{r_r}{tg^2 2\eta_r}$  a za  $tg\,2\eta_2 = r_2 tg\,2\eta_r / r_r$ , obdržíme:

$$\Delta r = \frac{2r_r}{tg^2 2\eta_r} \left[ 1 + \left( \frac{r_2}{r_r} \right)^2 tg^2 2\eta_r \right] \Delta\eta \quad (8.21)$$

Dosadíme-li tento vztah do (8.19), pak s využitím vztahu (8.20) dostaneme:

$$\varepsilon_{\varphi\psi_2} - \varepsilon_{\varphi\psi_1} = \frac{tg\,\eta_2 tg\,2\eta_r}{1 + \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 tg^2 2\eta_r} \cdot \frac{\Delta r}{2r_r} \quad (8.22)$$



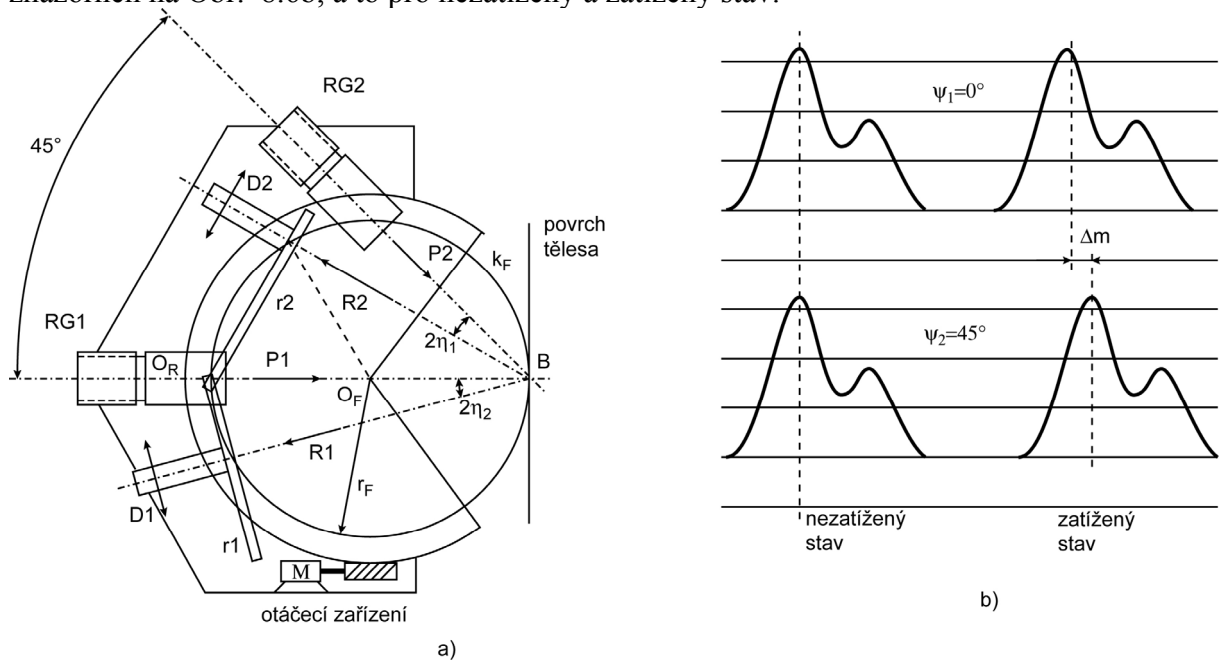
$$\text{kde } \eta_2 = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{r_2}{r_1} \operatorname{tg} 2\eta_r \right).$$

### Postup při určování $\sigma_\varphi$ ze směrnice přímky závislosti $\varepsilon_{\varphi\psi} \sin^2 \psi$

Předností metody  $\sin^2 \psi$  je to, že difrakce rtg. paprsků lze měřit při vícero úhlech  $\psi_i$  a s využitím lineární regrese proložit mezi uspořádanými dvojicemi  $\left[ \left( \varepsilon_{\varphi\psi_i} - \varepsilon_{\varphi\varphi_i} \right) \sin^2 \varphi_i \right]$  přímkou  $\varepsilon_{\varphi\psi} = k_\varphi \sin^2 \psi + b_\varphi$  (černé body na Obr. 8.3c). Napětí  $\sigma_\varphi$  se pak určí ze vztahu (8.10).

Rentgenografická měření podstatně urychluje zařízení, které detekuje difraktované záření pomocí detektorů záření. Na Obr. 8.6a je schéma v ČSSR patentovaného navrženého zařízení (komerční výroba byla realizována v zahraničí). Skládá se ze dvou zdrojů rtg. záření RG1, RG2, kterými jsou vzduchem chlazené speciální rentgenky firmy Chirana, jejichž ohniska jsou na obvodu fokusační kružnice  $k_f$  a jejichž osy jsou pootočený o  $45^\circ$ . Jako detektorů záření D1, D2 je použito dvou Geiger-Müllerových počítačů záření, které jsou otočně upevněny na kolmých ramenech  $r_1, r_2$  otočných kolem středu  $O_R$ . Natáčení detektorů se provádí tak, aby jejich osa stále směřovala do vyšetřovaného bodu B na povrchu tělesa. Přístrojem lze stanovit velikost napětí v jednom směru během 15 až 20 minut po nastavení přístroje. Velikostí clony na rentgenkách lze měnit velikost proměřované plochy v okolí bodu B od (5x5) mm do (10x20) mm. Udávaná přesnost měření pro běžné ocele je  $\pm 20$  MPa.

Průběh intenzity difraktovaného záření zachyceného detektory na registrační papír je znázorněn na Obr. 8.6b, a to pro nezatížený a zatížený stav.



Obr. 8.6

Při zatíženém stavu je zřejmý posuv  $\Delta m$  interferenčních maxim pro úhly ozáření  $\psi_1 = 0^\circ, \psi_2 = 45^\circ$ . Velikost  $\Delta m$  je mírou velikosti napětí  $\sigma_\varphi$  jak nyní odvodíme. Dosadíme-li do vztahu (8.16)  $\psi_1 = 0^\circ, \psi_2 = 45^\circ$  a použijeme-li vztah (8.19), dostaneme:

$$\sigma_\varphi = \frac{2E}{1 + \mu} \operatorname{tg} \eta_2 (\eta_2 - \eta_1) \quad (8.23)$$

Mezi rozdílem  $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$  difrakčních úhlů a posuvem  $\Delta m$  difrakčních maxim platí vztah:

$$\Delta\eta = \frac{\pi}{360r_F} \frac{c_2}{c_1} \Delta m \quad (8.24)$$

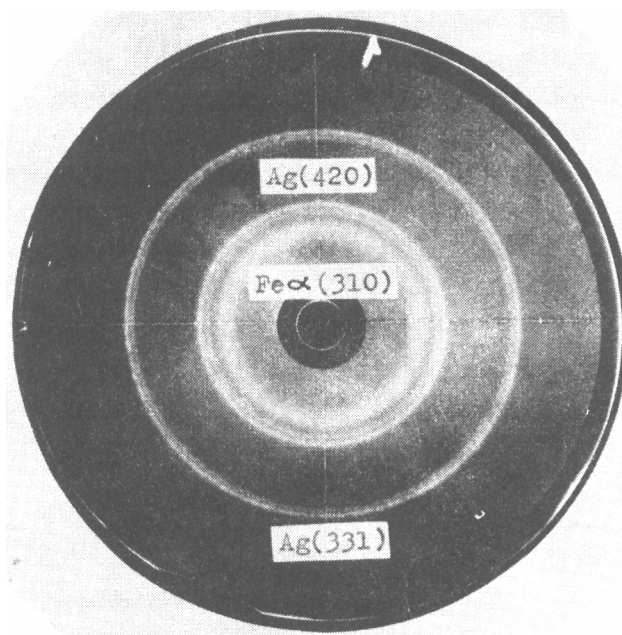
kde  $r_F$  je poloměr fokusační kružnice,  $c_1$  je rychlost posuvu registračního papíru,  $c_2$  je obvodová rychlost otáčení detektorů. Dosadíme-li vztah (8.24) do (8.23), obdržíme:

$$\sigma_\varphi = \frac{2E}{1+\mu} \operatorname{tg}\eta_1 \frac{\pi}{360r_F} \frac{c_2}{c_1} \Delta m \quad (8.25)$$

#### 8.4 Praktické pokyny pro zhotovení rentgenografů:

- povrchovou vrstvu na měřeném tělese je nutné chemicky nebo elektrolyticky odleptat asi do hloubky 0,1 mm, abychom odstranili mechanickým opracováním porušené krystaly. Je nevhodná třískové opracování nebo broušení, kterými se ovlivňuje charakter napjatosti v povrchové vrstvě. Vhodnější je elektrolytické leptání, protože při chemickém leptání kyselinami dochází k difúzi vodíku do povrchové vrstvy kovu a důsledkem je zvětšení napětí v této vrstvě (řádově 200MPa);
- tloušťka vrstvy prášku referenčního kovu se volí taková, aby interferenční kružnice referenčního kovu měla přibližně stejné zčernání jako kružnice zkoumaného materiálu,
- vzdálenost  $v$  se volí v rozmezí 50-60 mm. Expoziční doby jsou závislé na použitém druhu záření a na materiálu vzorku a jsou od desítek minut do několika hodin.

Ukázka rentgenogramu s difrakčními liniemi železa  $\text{Fe}\alpha$  (310) a stříbra  $\text{Ag}$  (331),  $\text{Ag}$  (420) jsou na Obr. 8.7.



Obr. 8.7

#### 8.5 Poznámka k měření zbytkové napjatosti

Rentgenová tenzometrie se dnes převážně používá k určování zbytkového napětí jako vhodná nedestruktivní metoda. Již z PPI víme, že tato napjatost vzniká v případech, kdy napjatost v tělese je nehomogenní a zatížení takové, že nastal elasticko-plastický stav z něhož nastalo odlehčení. Dále víme, že vnitřní zbytkové síly tvoří na uvolněném prvku rovnovážnou

soustavu. Podle toho jak velký je uvolněný prvek na němž nastává rovnováha, členíme zbytková napětí na:

- zbytková napětí makroskopická (I. druhu), která se projevují v makroobjemech materiálu jako homogenní tahová nebo tlaková napjatost. Tato napětí se vyskytují zejména v rychle chladnoucích odlitcích nebo v odlitcích s různou tloušťkou stěn.
- zbytková napětí mikroskopická (II, druhu), projevující se v mikroobjemech materiálu - napjatost je homogenní po jednotlivých krystalech, krystal od krystalu různá. Vyskytují se zejména jako důsledek procesu vyvolávajících zplastizování materiálu, při nichž dochází k porušení krystalu a tím ke zmenšení reflexních oblastí. Šířka interferenční kružnice je větší než u napětí I. druhu,
- zbytková napětí mikroskopická (III, druhu) - projevující se v oblastech několika krystalografických rovin.

U většiny technických materiálů vznikají uvedené typy zbytkových napětí prakticky současně, neboť materiál je heterogenní směsí různých složek, které se při zpracování materiálu chovají různě. V rentgenové tenzometrii existují metody umožňující určit napětí I. a II. druhu.

## **8.6 Problémy, přednosti a nevýhody rentgenové tenzometrie**

Již v úvodu k této měřicí metodě jsme uvedli některá její specifika vzhledem k ostatním tenzometrickým metodám. Zde je po ozřejmění celé problematiky uvádíme komplexně:

- Metoda se dnes aplikuje především na polykrystalické materiály, protože je založena na principu měření změny vzdálenosti atomových rovin krystalické mřížky (nevýhoda).
- Při určování napětí rentgenovou difrakční technikou není nutné znát nezatížený stav tělesa, je tedy možné určovat napjatost v procesu zatěžování i zbytkovou napjatost (výhoda).
- Napjatost se určuje bez destrukce materiálu tělesa (výhoda).
- Rentgenová tenzometrie je prakticky bodovou metodou - umožňuje určovat napjatost na velmi malé plošce povrchu tělesa, lze tedy vyšetřovat i velmi nehomogenní pole napjatosti (výhoda).
- Jak jsme již uvedli rentgenová difrakční metoda je metodou selektivní, což znamená, že na vzniku difrakční kružnice se nepodílejí všechny krystalky zasažené v okolí vyšetřovaného bodu rtg. paprsky, ale jen ty, které mají příznivou orientaci vzhledem k primárnímu svazku paprsků. Naměřená deformace (a z ní stanovené napětí) není tedy střední hodnotou pro všechny krystalky v objemu zasaženém rtg. paprsky, ale jen pro soubor vybraných krystalků určité orientace, přičemž tento soubor se mění se směrem dopadajícího paprsku. Je tedy střední hodnotou v určitém krystalografickém směru.
- Naměřené přetvoření je elastické, protože na změně vzdálenosti atomových rovin se nepodílí plastická deformace.
- Rentgenová tenzometrie umožňuje rozlišit makroskopická a mikroskopická napětí.
- Přesnost metody je závislá mimo jiné na přesnosti stanovení polohy interferenční kružnice, tj. na její ostrosti.
- Bez použití registrace polohy interferenčních čar Geiger - Müllerovým počítačem je rentgenografická metoda velmi zdlouhavá (desítky hodin).

Mezi nejpodstatnější problémy rentgenové tenzometrie patří problém hodnot elastických konstant ve vztazích pro napětí, vyvolaný selektivním charakterem

rentgenometrické metody a elasticou anizotropií krystalků kovu. Kdyby byly krystalky elasticky izotropní, bylo by jedno, zda se na výsledku měření podílejí všechny krystalky v ozářeném objemu, nebo jenom některé krystalky s určitou orientací a bylo by možno použít běžně makroskopické hodnoty  $E$ ,  $\mu$ . Krystalky však vykazují v různých krystalografických směrech různé elastické konstanty. Pro anizotropní materiál, pro který platí Hookův zákon, je obecně 36 elastických konstant, které jsou koeficienty v lineárních vztazích mezi složkami  $T\sigma$  a  $T\varepsilon$ :

S využitím termodynamických zákonů lze tento počet elastických konstant snížit na 21, což je maximální počet nezávislých konstant. Pro velmi často se vyskytující strukturu kubickou centrovanou, mají uvedené vztahy tvar:  $\sigma_x = c_{11}\varepsilon_x + c_{12}\varepsilon_y + c_{44}\gamma_{yz}$ . Dále uvádíme hodnoty elastických konstant pro tuto strukturu pro různé kovy.

Kov	struktura kubicky centrovaná	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{44}$
Al	plošně	1,08	0,62	0,28
Cu	plošně	1,70	1,23	0,75
Fe	prostorově	2,37	1,41	1,16
Pb	plošně	0,48	0,41	0,14
K	prostorově	0,046	0,037	0,026

Údaje elastických konstant jsou v jednotkách  $10^5$  MPa.

## 9 Metoda termální emise (SPATE METHOD)

SPATE - metoda (Stress Pattern Analysis by the Measurement of Thermal Emission) vyvinuta anglickou firmou SIRA, je bezkontaktní metodou pro celoplošná sledování napjatosti na površích cyklicky namáhaných těles. Je založena na fyzikálním jevu, že při cyklickém namáhání těles dochází v nich k malým teplotním změnám, takže na jejich povrchu lze detekovat infračervená záření.

Měření infračerveného záření prostřednictvím lineárního detekčního systému je založeno na termoelastické technice pro kvantitativní určení napětových změn. Mezi signálem  $S$  ze zařízení a změnou hlavních napětí platí za předpokladu adiabatických podmínek vztah:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = AS,$$

kde  $A$  je kalibrační faktor závislý na vlastnostech materiálu a charakteristice systému.

Měřicí systém SPATE se skládá ze skenovací hlavičky a detekční jednotky, analogové a digitální jednotky, displeje a paměti. Sledovaný povrch je snímán bod po bodu, obdržený signál je v digitální formě ukládán do paměti a po zpracování signálu je možné sledovat z video monitoru s vysokou rozlišovací schopností pole napětí v 16-ti barevných odstínech. Zařízení umožňuje širokou volbu ve výběru velikosti sledovaného povrchu a v počtu scanovaných bodů. Nejmenší sledovaná ploška může mít rozměry 0,6 x 0,6 mm. Teplotní citlivost zařízení je taková, že se dosahuje rozlišovací schopnost 1 N/mm<sup>2</sup> u oceli a 0,4 N/mm<sup>2</sup> u hliníku.

V roce 1987 bylo využíváno celkově 50 měřících jednotek SPATE. Kromě zjišťování pole napětí u významných cyklicky namáhaných těles (tlakové nádoby s pulzujícím tlakem ...) se tato metoda uplatňuje i v lomové mechanice.

Uvádí se, že mezi SPATE signálem  $AS$  z bodu v blízkosti kořene trhliny o souřadnicích  $r$ ,  $\varphi$  a faktory intenzity napětí  $K_I$ ,  $K_{II}$  platí vztah:

$$AS = \left[ K_I \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) - K_{II} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right] \sqrt{\frac{2}{\pi r}}$$

Z tohoto vztahu lze na základě změřených signálů  $AS$  v určitých bodech  $(r, \varphi)$  stanovit faktory  $K_I, K_{II}$ .

**SPATE metodu lze aplikovat i na problematiku rychlosti šíření trhlin při cyklickém namáhání.**

## 10 Měřicí metody pro sledování procesu porušování těles

S problematikou porušování soudržnosti těles jsem se setkali již při studiu pružnosti a pevnosti. Zde jsme uvedli, že porušování soudržnosti se projevuje vznikem trhlin a v konečné fázi rozpadem na více samostatných částí (lomem). Charakterizovali jsme mezní stavy, které souvisejí s porušováním soudržnosti a to mezní stav porušení, stability trhliny, trhlin a mezní stav lomu. Detailněji jsme se zabývali tzv. K - koncepcí, založenou na řešení lineárně pružné napjatosti a deformace ve spojitém tělese s trhlinou a umožňující posuzovat mezní stav stability trhliny u určitých typů těles s určitými trhlinami. Existuje však řada případů, kdy analytické i numerické řešení problematiky šíření trhlin není za současné úrovně poznání možné. V těchto případech, jsou k dispozici měřicí metody pro sledování procesu porušování těles, k nimž především řadíme :

- 1) metody pro sledování porušování tenké vrstvy materiálu naneseného na povrch vyšetřovaného tělesa umožňující určit přetvoření a napjatost na povrchu tělesa. Patří sem metoda křehkých laků a metoda folie s praskavou vrstvou;
- 2) metody pro sledování procesu porušování soudržnosti na povrchu a uvnitř těles a zjišťování stavu, kdy se kumulace poškození stává nepřijatelnou. Patří sem metoda akustické emise;
- 3) metody pro indikaci vzniku a šíření trhlin na povrchu těles. Řadíme sem metodu indikace vzniku trhliny vodivým nátěrem a metodu indikace trhliny foliovými snímači;
- 4) metody rozborů lomové plochy po lomu součásti. Tento rozbor umožňuje zjistit příčiny, které vedly ke vzniku lomu. Patří sem fraktografie.

### 10.1 Akustická emise

Akustickou emisí je označován fyzikální jev, při němž se v důsledku lokálních nevratných pohybových změn ve struktuře materiálu tělesa uvolňuje energie a šíří se materiálem prostřednictvím napěťových vln. Měřením a vyhodnocováním napěťových vln (akustického signálu) lze získat informace o vzniku a charakteru vnitřních fyzikálních změn v materiálu. Akustická emise je dnes samostatným vědním oborem se širokým rozsahem řešené problematiky. Patří sem především přiřazování vzniku napěťových vln konkrétnímu fyzikálnímu procesu, detekce, registrace a zpracování těchto vln, lokalizace jejich zdrojů, včetně interpretace výsledků akustické emise na řešení příslušného vědeckého nebo technického problému.

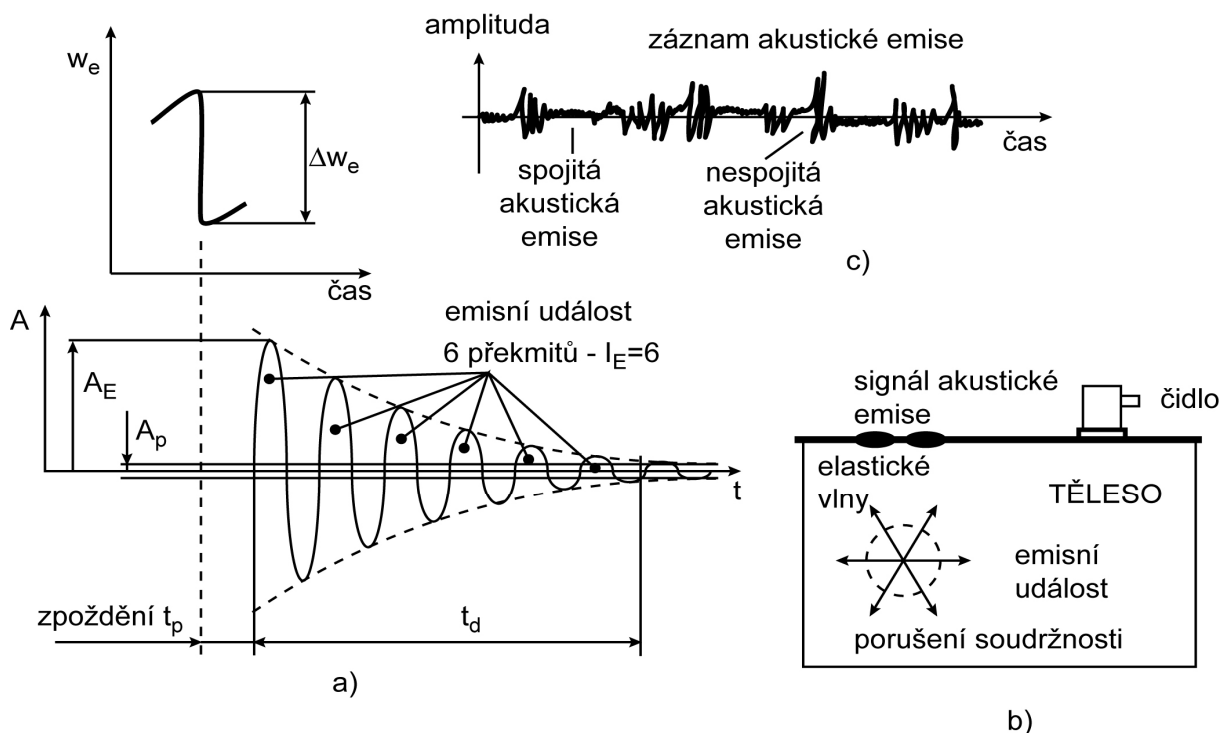
#### 10.1.1 Fyzikální podstata vzniku akustické emise a příčiny jejího vzniku

Fyzikální podstatu vzniku akustické emise ilustrujeme na procesu šíření trhliny. V pružnosti a pevnosti jsme uvedli, že proces šíření trhliny je spojený s uvolňováním energie napjatosti. Tento proces má skokový charakter a je doprovázený lokálně dynamickými jevy s nimiž souvisí i vznik akustických signálů akustické emise. Z fyzikálního pohledu lze tedy konstatovat, že akustická emise může mít příčinu ve skokové změně nahromaděné elastické energie napjatosti při porušování struktury materiálu, kdy oblast porušení přechází do nového rovnovážného stavu a tento přechod má impulsní charakter.

Při přechodu na jiný rovnovážný stav se lokální zóna v níž dochází k porušování soudržnosti rozkmitá a z tohoto místa rozruchu vycházejí (jsou emitovány) elastické vlny. Vzniká tzv. **emisní událost**, Obr. 10.1.

Vlny se šíří podle zákonů platných pro ultrazvukové vlny, tzn., že se tlumí, odrážejí a

transformují při šikmém dopadu, přičemž se mění i jejich tvar. Piezoelektrický snímač, umístěný na povrchu tělesa, převede šířící se vlny na tlumené kmity (pulsy), Obr. 10.1a. Mezi časovým okamžikem uvolnění elastické energie a první detekcí akustické emise snímačem je jistá časová prodleva, odpovídající době zpoždění  $t_p$ , během níž elastická vlna se dostane od místa svého vzniku ke snímači.



Obr. 10.1

Akustickou emisi lze pozorovat při zatížení nejrůznějších pevných látek, kovů, betonu, skla, keramiky, spojovacích materiálů, žáruvzdorných a kompozitních materiálů, hornin apod. Procesy vyvolávající tento jev mohou mít mikroskopický i makroskopický charakter a patří mezi ně:

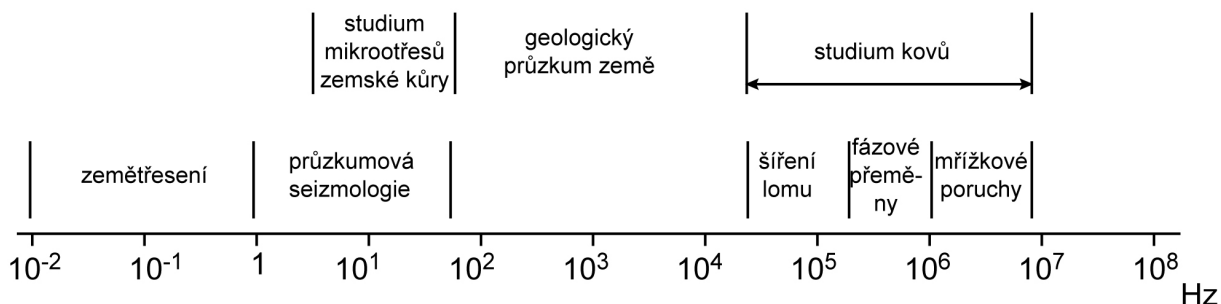
- vznik a rozvoj mikrodefektů,
- fázové přeměny materiálů,
- plastická deformace spojená se vznikem skluzových pásů nebo s intenzivním pohybem dislokací,
- u polymerních materiálů pak vznik lokálně přetvořených zón,
- u kompozitních materiálů přetrhávání vyztužujících vláken, dekoheze vláken a matrice apod.

Uvedeným příčinám vzniku akustických signálů odpovídá různá uvolňovaná akustická energie; řádově má tyto hodnoty:

- $10^{-18}$  až  $10^{-3}$  J u zdrojů na úrovni mikrostruktury, mezi něž např. patří kmitání krystalické mřížky způsobená pohybem dislokací, jejich hromadění a uvolňování, dále pak porušování soudržnosti na úrovni jednotlivých zrn,
- $10^{-3}$  až 1 J u zdrojů na úrovni makrostruktury, např. od porušování skupin zrn až po skokové šíření trhliny podkritické velikosti.

Práh detekovatelnosti signálů akustické emise je přibližně  $10^{-1}$  J.

Frekvenční pásmo akustického signálu emitovaného zdroji na úrovni mikrostruktury je řádově jednotky až desítky MHz, u zdrojů na úrovni makrostruktury od infrakmitočtů do jednotek MHz. Na Obr. 10.2 jsou vymezeny oblasti aplikací akustické emise v závislosti na frekvenci uvolňovaných vln.



Obr. 10.2

### 10.1.2 Základní charakteristiky akustické emise

Záznam napěťových vln, přicházejících z tělesa na jeho povrch, má průběh dle Obr. 10.1a (záznam z osciloskopu). Pro charakterizování tohoto průběhu signálu a tím i charakterizování vlastností signálů akustické emise se zavádí řada pojmů. Především mezi ní patří pojem - událost akustické emise, zkráceně **emisní událost** (EU) - (acoustic emission event), charakterizovaná jako jeden ztlumený periodický signál s počáteční amplitudou  $A_E$  a celkovou dobou doznívání  $t_d$  pod určitou prahovou úroveň amplitudy  $A_p$ . Amplituda  $A_p$  je ve vztahu s určitou prahovou hodnotou napětí  $U_p$  na snímači - obvykle bývá  $U_p = IV$ . U zařízení pro výzkumné činnosti je možno hodnotu  $U_p$  nastavovat.

Podle časového sledu emisních událostí, podle velikosti frekvencí a amplitud lze akustickou emisi členit na:

- **spojitou emisí** (continuous emission - nebo nízkourovňová kontinuální akustická emise), pro kterou je charakteristický spojitý sled EU a vysokou četností. Dále je pro ni typická vysoká frekvence (řádově kHz až 30MHz) vln a malé amplitudy, jinými slovy vysoká hustota emisí o velmi malé energii. Tento typ emise provází většinou počáteční stadia poškozování materiálů (pohyby dislokací) a relativně pomalé směny zachycující rozsáhlejší oblasti, jako je např. creep za zvýšených teplot. V praxi tento typ emise se projevuje zvýšením úrovně šumového pozadí. Na detekci této emise jsou potřebné vysoce citlivé snímače a zařízení s nízkým vlastním šumem. Zpracování a hodnocení kontinuální akustické emise se provádí klasickými prostředky šumové analýzy;
- **nespojitou emisí** (burst emission - taktéž emise pulzního typu, praskavá emise, bouřlivá emise), pro kterou je charakteristické, že jednotlivé EU jsou v čase výrazně odděleny. Je pro ni typická nižší frekvence akustických pulzů (30 až 100 kHz) a značně vyšší amplitudy. Zdroje akustické emise jsou silně lokalizovány, pulzy jsou dobře rozlišitelné a svou podstatou aperiodické. V důsledku transformací vln v materiálu a ve snímači dostávají tyto pulsy periodický, tlumený charakter jak je znázorněno na Obr. 10.1a. Nespojité emise je obvykle spojena se vznikem a rozvojem makrodefektů.

Signály akustické emise lze hodnotit podle různých kritérií různými charakteristikami.

Patří sem:

a) Parametry emisní události:

- **amplituda emisní události** ( $A_E$ )- maximální amplituda v průběhu emisní události,
- **energie emisní události** ( $U_E$ )- energie uvolněná v jedné emisní události,
- **doba doznívání**  $t_d$  [a] - doba od počátku emisní události po útlum amplitudy na prahovou hodnotu  $A_p$ ; je návrh nahradit ji pojmem
- **doznej emisní události** ( $I_E$ ) - počet pulzů v jedné emisní události.

b) Kumulativní parametry akustické emise:

- **počet emisních událostí** ( $N_E$ ) - součet emisních událostí,
- **počet pulzů akustické emise** ( $N_C$ ) - součet pulzů emisního signálu, jejichž amplituda



převyšuje amplitudu  $A_p$ . Jako synonymum se používá pojem celková akustická emise ( $\Sigma N$ ).

- **energie akustické emise ( $U$ )** - celková energie uvolněná akustickou emisí.

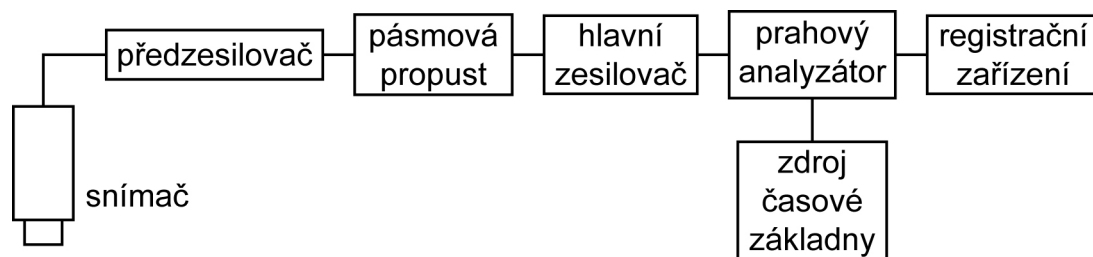
c) Rychlostní parametry akustické emise

- **rychlost uvolňování emisních událostí ( $N'_E$ )** - počet emisních událostí za jednotku času,
- **rychlost uvolňování pulzů akustické emise ( $N'_c$ )** - počet pulzů akustické emise za jednotku času - synonymem je pojem rychlost akustické emise ( $N'$ ),
- **rychlost uvolňování energie akustické emise ( $U'$ )** - energie akustické emise uvolněná za jednotku času - udává výkon signálu akustické emise.

Sledujeme-li akustickou emisi v určitém časovém intervalu (např. v průběhu tahové zkoušky, při lomovém testu, v průběhu letových zkoušek) můžeme jednotlivé akustické události třídit podle uvedených charakteristik, zaznamenávat jejich četnosti v jednotlivých třídách a sestrojovat histogramy četnosti. Tyto histogramy se označují jako distribuční charakteristiky akustické emise, které přinášejí informace o energetických relacích např. při vzniku a šíření trhlin a tedy o mechanismu porušování zkoumaného materiálu.

### 10.1.3 Měřicí a vyhodnocovací řetězec pro akustickou emisi

Blokové schéma nejjednoduššího měřicího řetězce je znázorněno na Obr. 10.3.



Obr. 10.3

Signál akustické emise je ve většině případů snímán piezoelektrickými snímači - buď jednoduchými nebo diferenciálními. Pro teploty do 200°C se k výrobě čidla snímačů používají tuhé roztoky titaničitanů a zirkoničitanů, pro teploty do 650°C slitiny lithia a niobu. V některých případech se používají i snímače kapacitní, které jsou sice přesnější, ale méně citlivé. Snímače se na povrch tělesa připevňují mechanickými přichytkami, přilepením nebo magneticky.

Dalším prvkem měřicího řetězce jsou **zesilovače**. Jelikož snímač má na výstupu velmi nízkou napěťovou úroveň (efektivní hodnota napětí je cca  $10^{-5}$  až  $10^{-4}$  V), je nutno signál zesílit nejprve nízkošumovým zesilovačem, aby byl schopen dalšího zpracování. Nejprve je zařazen předzesilovač, který je nízkošumový, širokopásmový s frekvenčním rozsahem 1 až 2 MHz a se zesílením 40 dB. **Hlavní zesilovač** má měnitelné zesílení od 2 do 80 dB, se šířkou pásma kolem 1 MHz, signál na výstupu se pohybuje od 2 do 5 V.

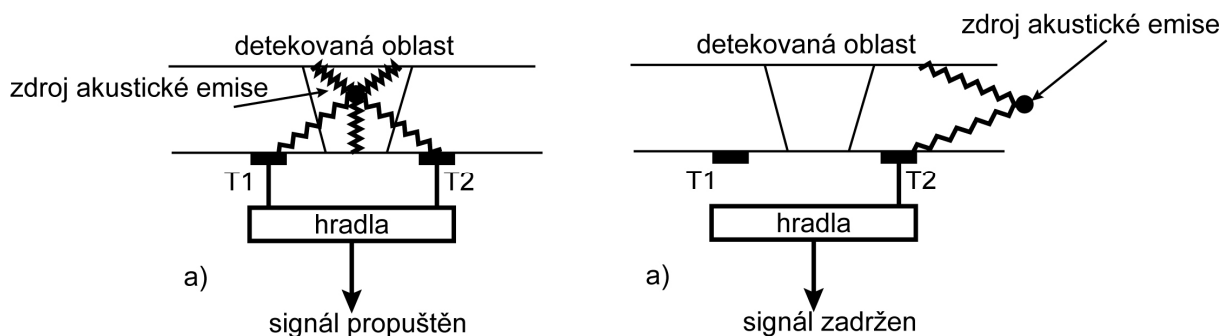
Důležitým prvkem měřicího řetězce jsou **filtry**, které slouží k potlačení signálů s nežádoucími charakteristikami (nízké amplitudy, nízké a vysoké frekvence apod.). Tento proces se označuje jako **diskriminace signálů** a může být různého typu:

- **amplitudová**, kdy se propouští pouze signály o určité amplitudě - např. prahový analyzátor propouští pouze ty pulsy, které mají vyšší amplitudu, než je prahová hodnota  $A_p$ , hranový diskriminátor, propouštějící pouze pulzy v určitém rozsahu amplitud,
- **frekvenční** - provádí se filtračním členem, omezující nízké nebo vysoké frekvence, resp. propouští frekvence jen v určitém frekvenčním rozsahu,
- **časová** (koincidenční) - potlačuje signály vznikající provozním šumem. Tato filtrace má

v akustické emisi prioritní význam, protože měřené akustické signály je nutno oddělit od parazitního šumu. Význam koincidenční diskriminace v akustické emisi je obdobný teplotní kompenzaci u tenzometrických měření, která odstraňuje parazitní vliv teploty na měřená délková přetvoření.

Jedním ze základních způsobů časové diskriminace je tzv. diskriminace koincidence signálů dvou snímačů (**Obr. 10.4**). Je založena na koincidenčním (shodném) příjmu dvou snímačů stejně vzdálených od vyšetřované oblasti v níž se předpokládá zdroj akustické emise. Hradlo propustí pouze signál, který se objeví současně na obou snímačích, (**Obr. 10.4a**). Přichází-li signál např. zprava, (**Obr. 10.4b**) a ne z detekované oblasti, objeví se nejprve na snímači T2 a není hradlem propuštěn.

Existuje celá řada dalších diskriminací na potlačení šumu jako systém hlavního a podřízeného snímače, diskriminace podle náběžného času, které jsou popsány v odborné literatuře.



Obr. 10.4

Posledním prvkem řetězce jsou **vyhodnocovací obvody**, které analyzují amplitudy akustické emise, dobu trvání akustické události, frekvence a další charakteristiky akustické emise. Dále je zde čítač impulsů ovládaný časovou základnou umožňující zaznamenat celkový počet signálu  $\Sigma N$  nebo  $N'$  počet impulsů za časovou jednotku. Tiskárna zaznamenává ve zvolených intervalech zvolené hodnoty veličiny  $\Sigma N$  nebo  $N'$  a další parametry experimentu jako zatížení, prodloužení, čas apod. Dále jsou připojeny zapisovače, osciloskop a případné propojení na počítač.

#### 10.1.4 Aplikační sféry akustické emise.

Již v odstavci 10.1 jsme ukázali, že akustická emise je charakterizována řadou parametrů, jejichž hodnoty slouží pro nejrůznější analýzy výsledků akustické emise a jsou nositeli rušných informací o akustické emisi i o samotném sledovaném objektu. Některé z těchto parametrů spolu s charakterem přenášené informace jsou uvedeny v Tab. 10.1 .

Aby bylo možná provádět analytickou analýzu signálů akustické emise, modeluje se tento průběhem tlumené sinusovky popsané vztahem:

$$A = A_E e^{-\beta t} \sin \omega t \quad (10.1)$$

kde  $\omega$  je rezonanční frekvence snímače,  
 $A_E$  je počáteční amplituda signálu,  
 $\beta$  je koeficient tlumení, určovaný obecně pomocí ultrazvuku.

Délka časového intervalu, v němž je obálka signálu na výstupu ze snímače nad prahovou úrovní  $A_p$  se určí řešením rovnice  $A_p = A_E e^{-\beta t}$  vzhledem k  $t$ . Řešením je:

$$t = \frac{1}{\beta} \ln \frac{A_E}{A_p} \quad (10.2)$$

Parametry akustické emise	Přenášená informace
Tvar pulsu	Podrobná informace o struktuře zdroje akustické emise. Je-li signál spojitý – jedná se zřejmě o malý vzorek, jemnozrnný materiál, vznik mikroplastických deformací bez šíření trhlin.
Frekvenční spektrum	Podstata zdroje akustické emise. Frekvence $10^4 - 10^5$ Hz svědčí o poruchách většího typu (vznik a propojování mikrotrhlin). Frekvence na $10^5$ Hz odpovídá pohybu dislokací, fázovým přeměnám ...
Velikost amplitud	Energie zdroje akustické emise – mohutnost poruch.
Rozložení amplitud	Podstata mechanismů fyzikálních zdrojů akustické emise.
Rychlost akustické emise	Rychlost vzniku poškození.
Relativní čas příchodu signálů akustické emise zdroje	Lokalizace zdrojů akustické emise.

Tab. 10.1

Počet registrovaných emisních vln během jedné emisní události je pak dán vztahem:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} t \rightarrow n = \frac{\omega}{2\pi\beta} \ln \frac{A_E}{A_p} \quad (10.3)$$

Pro tento případ je tedy  $n = I_E$ .

Ze vztahu (10.3) je zřejmé, že měření počtu pulzů  $n$  je možné nahradit měřením maximální amplitudy  $A_E$  při známé prahové hodnotě  $A_p$ . Řada experimentů realizovaná na zkušebních tělesech umožnila formulovat vazby mezi některými faktory akustické emise a veličinami v uvedených vztazích. Charakteristika zdroje akustické emise ovlivňuje veličinu  $N_E$ , charakteristiky tělesa, veličinu  $\beta$ , umístění, typ a citlivost snímačů a frekvenční rozsah ovlivňují  $\omega$ ,  $\beta$ , zisk zesilovače pak veličinu  $A_p$ .

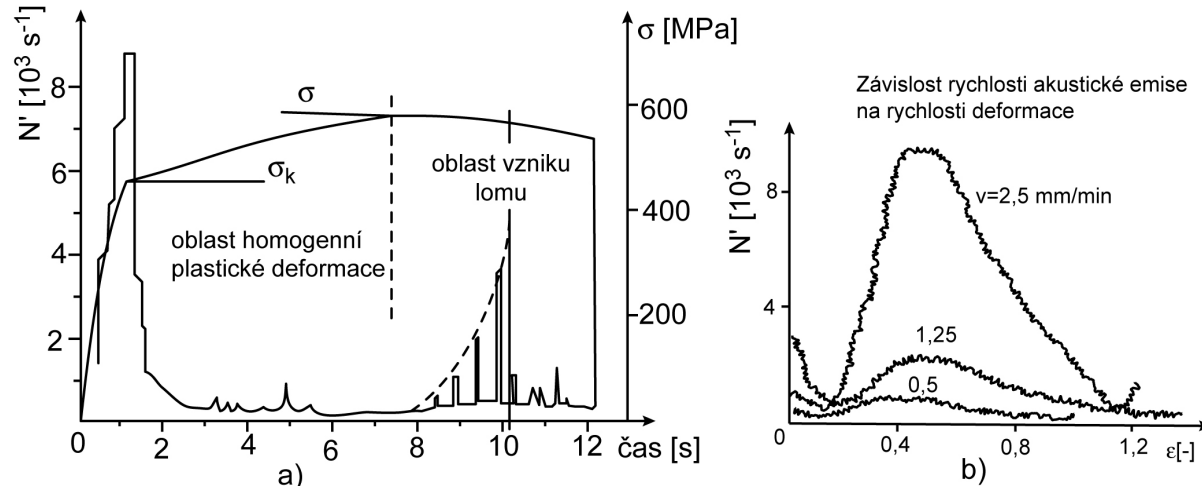
Jeden z největších problémů aplikace akustické emise spočívá v interpretaci výsledků akustické emise získaných na zkušebních vzorcích na reálná tělesa s různorodou velikostí, tvarem a s lokalizovanými zdroji akustické emise vzhledem k těmto charakteristikám těles. Zdroj akustické emise totiž vytváří sférickou napět'ovou vlnu, která se odráží od volných povrchů tělesa a dochází k interferenci vlnění a k rozptylu napět'ového impulsu. Dalším zdrojem signálů, které jsou podobné signálům ze zdrojů akustické emise je např. kmitání konstrukcí. Rozbor signálů detekovaných snímačem musí být proto před interpretací výsledků pečlivě analyzován, k čemuž může přispět např. frekvenční analýza signálů. Hodnocení signálů při analýze výsledků akustické emise vyžaduje mít k dispozici etalonové průběhy signálů pro jednotlivé materiály s ohledem na jejich chemické složení, tepelné zpracování, (mnohdy i pro jednotlivé tavby materiálu), dále pak zkušenosti pracovníků.

V dalším textu uvádíme jednotlivé **aplikační sféry** akustické emise.

#### a) Plastické deformace jako zdroj akustické emise

K objasnění vztahů mezi plastickou deformací a akustickou událostí použijeme výsledky tahové zkoušky oceli 12013. Na Obr. 10.5a je vynesena v závislosti na čase rychlost akustické emise ( $N'$ ) a průběh napětí  $\sigma$  ve zkušebním vzorku. Lze konstatovat, že rychlost

akustické emise má maximum v oblasti meze kluzu. Teoretické a experimentální rozbory dokazují, že akustická emise je spojena s pohybem dislokací. Před dosažením meze kluzu dochází k bouřlivé akustické emisi od určitých dislokací, které jsou již pohyblivé. Vzrůst hustoty pohyblivých dislokací v oblasti meze kluzu vede ke změně akustické emise na spojitou akustickou emisi, s ostrým maximem v místě maximální hustoty pohyblivých dislokací.



Obr. 10.5

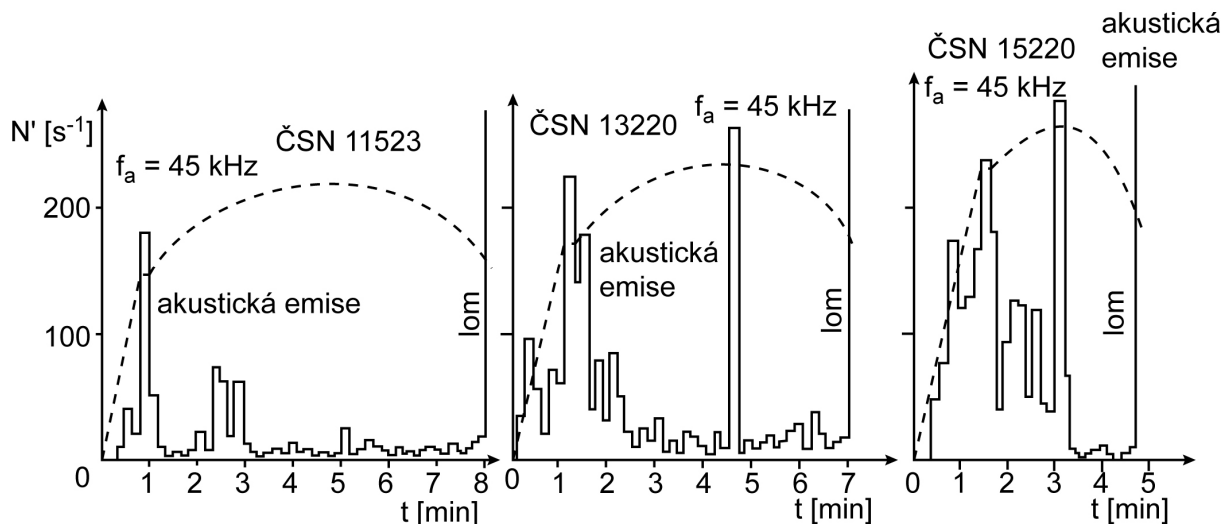
Další růst deformace způsobí snížení hustoty pohyblivých dislokací s čímž souvisí pokles rychlosti akustické emise. Experimentálně bylo zjištěno, že rychlost akustické emise závisí na rychlosti deformace, jak je zřejmé z Obr. 10.5b. Pro každý materiál je charakteristická určitá závislost rychlosti akustické emise na čase, jak to dokumentuje ilustrativní ukázka pro oceli na Obr. 10.6. Pro rychlost akustické emise během plastické deformace byly odvozeny tyto vztahy:

monokrystaly: 
$$N'_E = \frac{\varepsilon' H}{\varepsilon (\Delta x)}$$

polykrystalický materiál: 
$$N'_E = \frac{\varepsilon' AH}{\varepsilon (\Delta x) d^2} \quad (10.4)$$

kde  $H, A$  jsou výška a průměr vzorku,  
 $\Delta x$  přírůstek šířky deformačního pádu,  
 $d$  je průměr zrna,  
 $\varepsilon'$  rychlost zatěžování.

Dále se ukázalo, že charakteristiky akustické emise nezávisí na absolutní hodnotě napětí a délkových přetvořeních.



Obr. 10.6

### b) Akustická emise v lomové mechanice

Je všeobecně známo, že růst trhliny je spojen s uvolňováním elastické energie napjatosti. V souladu s vymezením akustické emise to znamená, že růst trhliny je spojen se vznikem napět'ových elastických vln a tedy se vznikem akustické emise. Z hlediska dislokačního modelu porušování soudržnosti lze vznik mikrotrhlin charakterizovat šířením skupin dislokací, přičemž obvykle vzniká bouřlivá akustická emise. Dokumentuje to experimentálně získaná závislost (Obr. 10.7) rychlosti akustické emise v závislosti na čase při sledování šíření trhliny na CT vzorku. Pro celkovou akustickou emisi se odvozuje vztah:

$$N_C = DS \quad (10.5)$$

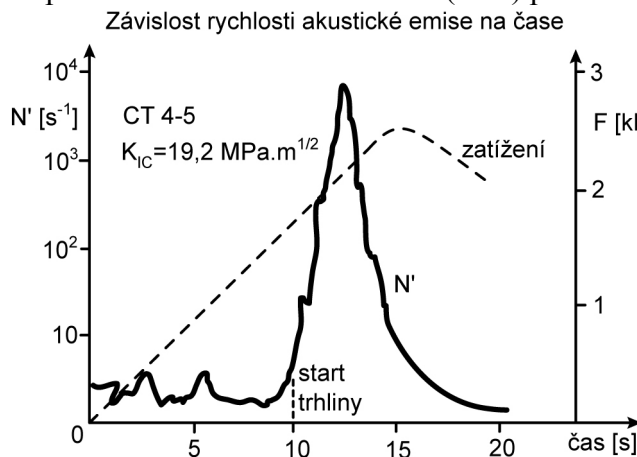
kde  $D$  je konstanta závisící na rychlosti deformace, teplotě a strukturních vlastnostech materiálu a tvaru vzorku,  
 $S$  je charakteristický rozměr plastické zeny na čele trhliny (např. její plocha), který je úměrný druhé mocnině faktoru intenzity napětí, tedy  $S \approx K_I^2$ .

Existuje tedy vztah mezi četností signálů  $N_C$  a faktorem  $K_I$ . Na základě výsledků experimentů byl navržen vztah:

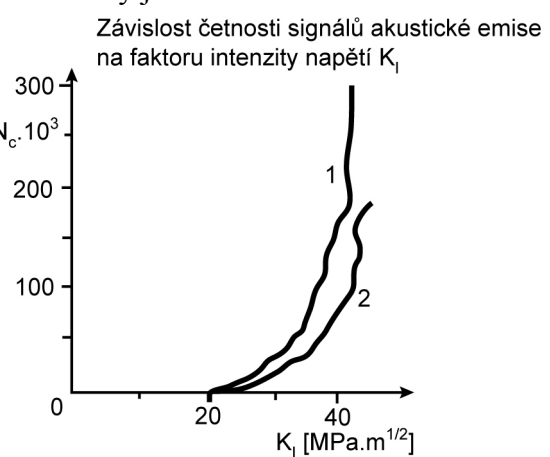
$$N_C = D(K_I)^m \quad (10.6)$$

kde  $m \in (2 - 8)$

Experimentálně získaná závislost (10.6) pro dvě různá trhliny je znázorněna na Obr. 10.8.



Obr. 10.7



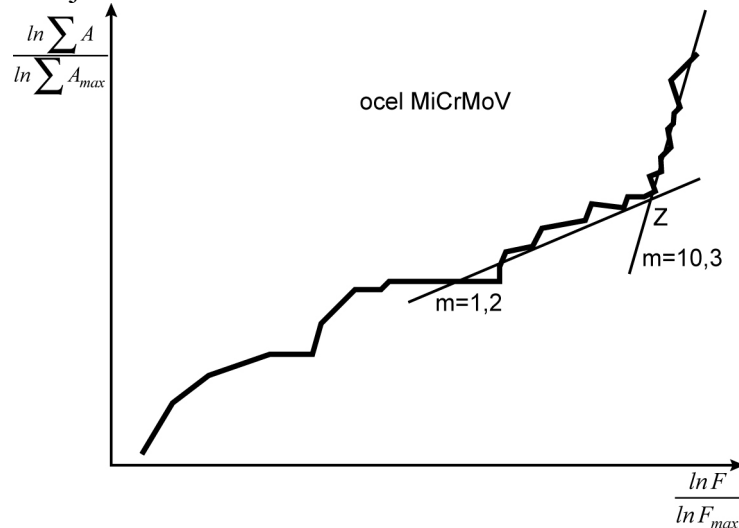
Obr. 10.8

Při zkouškách velkých vzorků ze ŠKODA Plzeň byl pro vyhodnocování emisní události použit vztah:

$$\Sigma A = \left( \frac{C}{m} F \right)^n$$

kde  $\Sigma A$  je suma amplitud emisních událostí,  
 $C$  je konstanta pro celou oblast zatěžování,  
 $F$  je zatěžovací síla  
 $N$  je exponent pro jednotlivá stadia porušování soudržnosti materiálu.

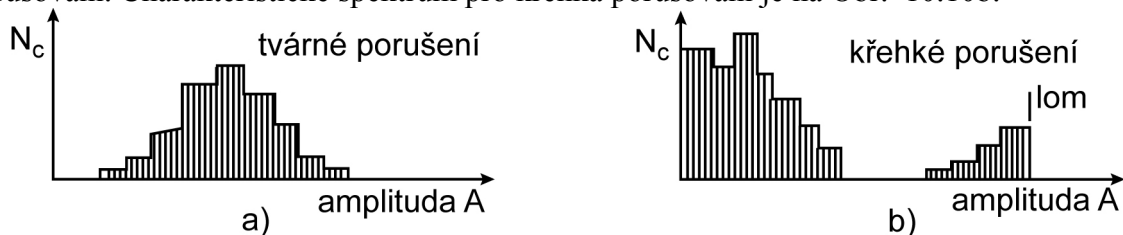
Výsledky experimentu jsou na Obr. 10.9



Obr. 10.9

Bylo zjištěno, že hodnota koeficientu  $m < 3$  odpovídá vzniku a rozvoji plastická zóny v okolí maximálního koncentrátoru napětí, hodnota  $m > 7$  odpovídá vzniku trhliny a jejímu stabilnímu šíření, bod Z zlomu odpovídá počátku nestabilního šíření trhliny.

Z obdobných záznamů lze usuzovat na přípustnost daného defektu spolu s určením doby funkční spolehlivosti. Cenné informace taktéž poskytuje amplitudová distribuce uvolňovaných napěťových vln. Symetrické spektrum na Obr. 10.10a odpovídá tvárnému porušování. Charakteristické spektrum pro křehká porušování je na Obr. 10.10b.



Obr. 10.10

### c) Akustická emise a únavový proces

Dle vztahu (10.6) existuje závislost mezi  $N$  a  $K_I$ . Dále je všeobecně známa experimentálně zjištěná skutečnost, že rychlost růstu únavová trhliny  $\frac{da}{dN}$  je závislá na změně faktoru intenzity napětí  $\Delta K_I$ , a že platí vztah:

$$\frac{da}{dN_v} \approx \Delta K_I^n \tag{10.7}$$

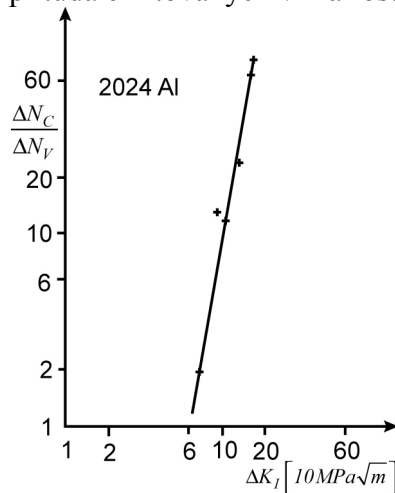
kde parametr  $n$  je závislý na materiálu, napjatosti, frekvenci cyklu, ...  
 $N_v$  počet cyklů při zatěžování vzorku.

Lze tedy dedukovat, že celková akustická emise během růstu únavová trhliny je taktéž závislá na veličinách  $\frac{da}{dN_c}$  a  $\Delta K$ . Dokumentuje to výsledek experimentu na Obr. 10.11, kde je

vynesena závislost celkové akustické emise na jeden cyklus, tj.  $\frac{\Delta N_c}{\Delta N_v} = f(\Delta K)$  pro slitinu

AlMgZn. Lineární závislost těchto veličin byla změřena i pro vysoce pevné oceli.

Experimenty ukazují, že akustická emise je vhodným prostředkem pro odhad počtu cyklů do lomu. Postupně jak trhlina nabývá kritická délky (od této délky nastává její nestabilní šíření), zvyšuje se amplituda emitovaných vln a roste rychlost akustické emise.



Obr. 10.11

#### d) Akustická emise v průběhu fázová transformace a při svařovacích procesech.

Je známo, že při martenzitických reakcích jsou pozorovány slyšitelná zvuky. Znamená to, že tento proces je zdrojem velmi intenzivní akustické emise nespojitého charakteru (burst emission). Dále lze konstatovat, že celková akustická emise ( $\Sigma N$ ) respektuje objem přetransformovaného materiálu a rychlost akustické emise ( $N'$ ) charakterizuje kinetiku jeho změny.

Při svařovacím procesu mohou být zdrojem akustické emise tyto skutečnosti: praskání strusky při tuhnutí svaru, vznik trhlín za tepla, vznik trhlín za studena v ovlivněné oblasti základního materiálu. Ze signálů akustické emise je však velmi obtížné tyto jednotlivé faktory od sebe odlišit. Nejčastěji se dnes používá monitorování oblasti svarů po svařování k hodnocení náchylnosti materiálů ke vzniku trhlín za studena.

#### e) Použití akustické emise pro diagnostiku životnosti konstrukcí

K technicky nejatraktivnějším oblastem použití akustické emise patří kontrola tzv. integrity konstrukcí (zachování jejich soudržnosti), zejména svařovaných, např. tlakových nádob, jaderných reaktorů, raket, raketoplánů apod. Hlavní důvody této aplikace jsou:

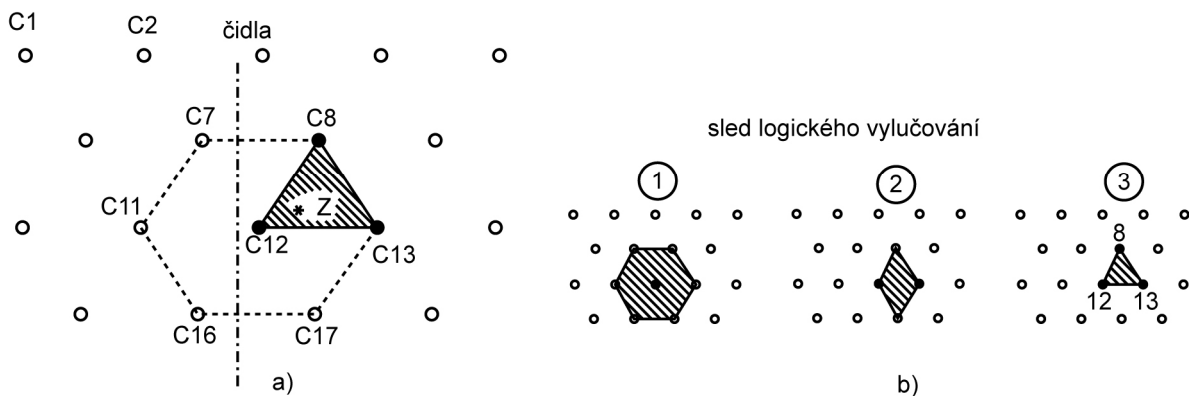
- malá účinnost lokalizace poruch soudržnosti jinými metodami,
- zabránění katastrofickým následkům v důsledku vzniku nestabilního šíření trhlín,
- identifikace defektů nespojitosti během provozu konstrukcí,
- zjištění náchylnosti k porušení soudržnosti konstrukcí při jejich intenzivnějších namáháních.

Při realizaci aplikačních sfér akustické emise má prioritní význam lokalizace zdrojů akustické emise pomocí soustavy čidel rozmístěných na povrchu sledované konstrukce

ve vhodném geometrickém uspořádání.

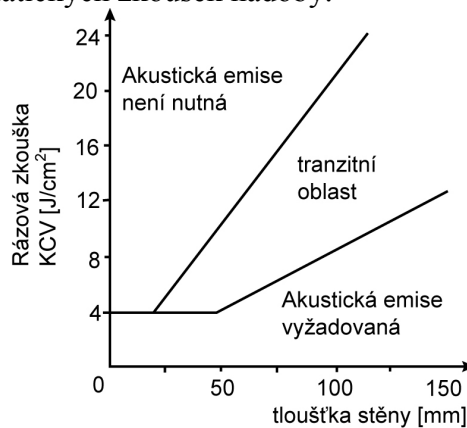
K lokalizaci zdroje akustické emise slouží časové rozdíly, se kterými jednotlivá čidla rozmístěná na povrchu tělesa snímají akustické signály. Snímače jsou na povrchu rozmístěny v trojúhelníkové konfiguraci a vylučují signály podle logické posloupnosti (tzv. metoda SEL - Sequential Exclusion Logic). Např. necht' signál vycházející ze zdroje Z (Obr. 10.12) dorazí nejprve do nejbližšího čidla C12. Po okamžiku detekce čidlem C12 musíme porovnat, jak bude reagovat dalších šest čidel obklopujících snímač C12 (na Obr. 10.12a je těchto šest čidel spojených přerušovanou čarou). Jestliže jako druhý v pořadí indikuje signál ze zdroje Z snímač C13, pak můžeme vyloučit snímače nalevo od čerchované přímky, tedy snímače C7, C11, C16. Signál musí tedy vycházet z pole vymezeného snímači C8, C12, C17. Indikuje-li signál jako třetí např. snímač C17, pak zdroj Z musí být v poli vymezeném snímači C8, C12, C13 (Obr. 10.12b). Lokalizace zdrojů akustické emise lze provádět tzv. hyperbolickou triangulací, která je popsána v odborné literatuře. Počet čidel, které je nutno použít pro lokalizaci zdrojů akustické emise souvisí se složitostí konstrukce, s počtem nebezpečných míst, které je potřebné monitorovat, s důležitostí konstrukce, se stupněm nebezpečí, které by vzniklo po havárii konstrukce, atd. Pro komplexní diagnostiku spolehlivosti konstrukce je nutno znát charakteristický průběh akustické emise materiálu konstrukce.

Grafická interpretace metody SEL pro lokalizaci zdroje akustické emise



Obr. 10.12

V současnosti je např. detailně rozpracováno použití akustické emise pro sledování tlakových nádob v chemickém a petrochemickém průmyslu. Obr. 10.13 ilustrativně ukazuje aplikační oblast akustické emise v závislosti na tloušťce nádoby a na hodnotě vrubové houževnatosti. Přípustnost defektů v nádobě se pak posuzuje podle záznamů celkové akustické emise, resp. její rychlosti, přičemž přípustný průběh akustické emise je stanoven na základě předchozích hydrostatických zkoušek nádoby.



Obr. 10.13



Akustická emise se dnes využívá v nejrůznějších technických oborech, např. v jaderné technice, v technologických procesech. V technicky vyspělých státech je dnes povinností vybavovat všechna důležitá technická díla (reaktory atomové a chemické, tlakové nádoby s nebezpečným obsahem, letadla,...) emisními detektory, aby bylo zamezeno haváriím zařízení, jejichž důsledkem by byly velké materiální škody resp. ohrožení lidských životů (např. havárie letadel typu Comet, havárie typu Černobyl a pod).

Při kontrole technických děl akustickou emisí se využívá Kaiserova jevu. Spočívá v tom, že při opakovaném zatěžování nastane emisní událost až při překročení původního zatížení (dále stimulu), pokud ovšem nenastala změna charakteru zatížení resp. nenastalo přerozdělení namáhání vlivem šíření trhlin nebo vlivem strukturálních směn (stárnutí, tepelná zpracování apod.).

Kontrolu akustické emise lze rozdělit do **tří úrovní**:

- **povýrobní** kontrola - účelem je zhodnotit stav konstrukce z hlediska celistvosti a získat podklady pro srovnávací zkoušky na dalších úrovních;
- **periodická** kontrola - účelem je srovnat výsledky získané při povýrobní kontrole nebo při poslední periodické kontrole, s výsledky získanými po určité, definované době provozu a provést závěry týkající se vzniku a vývoje nebezpečných poruch, včetně určení dalších vhodných provozních režimů;
- **nepřetržitá** kontrola - jde o kontinuální monitorování konstrukce z hlediska celistvosti za normálního provozu.

Jestliže v průběhu uvedených kontrol byly zjištěny emisní události, pak je důležitá zjištění, lokalizace a klasifikace zdroje emisní události.

O problémech zjišťování a lokace zdroje bylo již pojednáno. Na současné úrovni poznání je reálná klasifikovat zdroje podle americká normy ASTM E 569. „Standardní doporučený postup pro kontrolu konstrukcí akustické emise během řízené stimulace“. Podle této normy se zdroje **klasifikují** podle těchto dvou **kritérií**:

- **emisní (akustická) aktivity**  $A_E$ , která je charakterizována charakterem závislosti celkového počtu pulsů  $N_C$ , nebo počtem emisních událostí  $N_E$  v závislosti na stimulu  $p$ . Mírou aktivity je veličina:

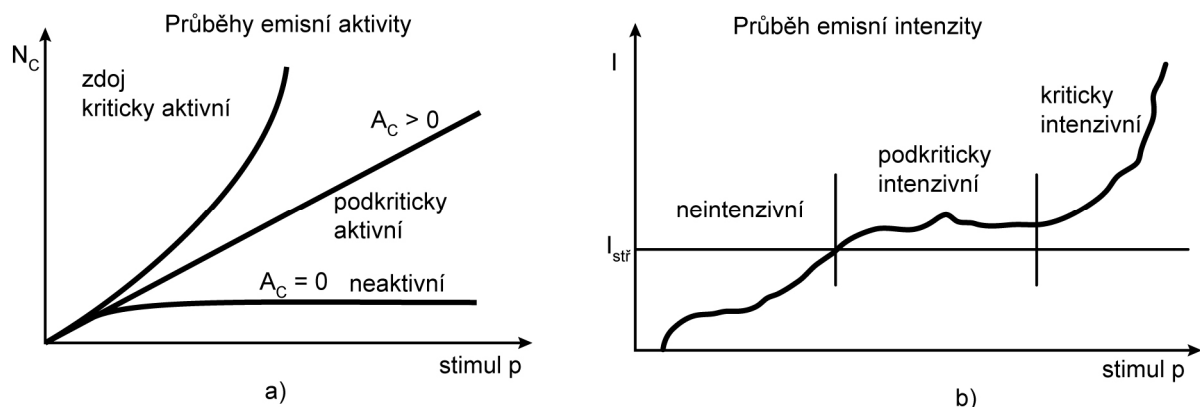
$$A_C = \frac{\partial N_C}{\partial p}, \text{ resp. } A_E = \frac{\partial N_E}{\partial p} \quad (10.8)$$

Jestliže je  $A=0$ , zdroj se označuje jako **neaktivní**, pro  $A>0$  jde o zdroj aktivní a to buď **podkriticky aktivní**  $A(p)=konst.$ , nebo **kriticky aktivní**, Obr. 10.14a.

- **emisní intenzity**  $I$ ; mírou intenzity je průměrná amplituda emisní události  $I_{stř}$  a veličina  $I_E$ , které jsou dány vztahy:

$$I_{stř} = \frac{\Sigma A_0}{\Sigma N_E}, \quad I_E = \frac{\partial \Sigma A_0}{\partial \Sigma N_E} \quad (10.9)$$

Zdroj je považován za **neintenzivní**, jestliže je  $I < I_{stř}$ . Zdroj je **podkriticky intenzivní**, jestliže platí  $I \doteq I_{stř}$  a  $I \doteq 0$  a je **kriticky intenzivní** při  $I > I_{stř}$ ...Obr. 10.14b.



Obr. 10.14

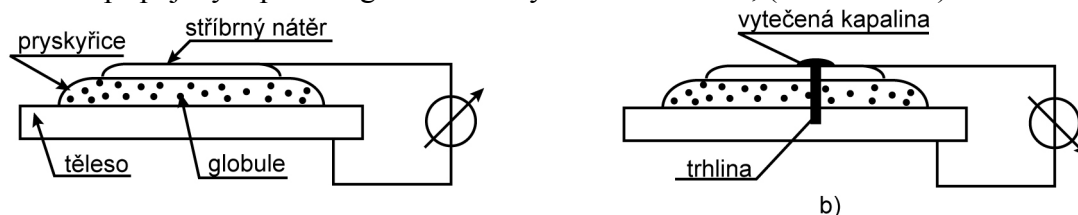
Podle uvedené klasifikace zdrojů jsou pak vyvozovány tyto závěry:

- zdroje nízké aktivity a intenzity nemusí být dále sledovány,
- zdroje podkriticky aktivní, ale neintenzivní by měly být pouze zaznamenány pro další sledování,
- zdroje podkriticky intenzivní jsou ukazatelem možného růstu trhliny a měly by být zhodnoceny jinými nedestruktivními metodami a po vyhodnocení rozhodnuto o stupni provozuschopnosti zařízení,
- zdroje kriticky aktivní a kriticky intenzivní jsou ukazatelem procesu porušování v konstrukci, musí být zhodnoceny jinými nedestruktivními metodami a zodpovědně posouzena jejich další provozuschopnost.

## 10.2 Indikace vzniku a šíření trhliny vodivým nátěrem (CDC - Crack Detection Coating)

Nátěr vyvinutý firmou BLH-Elektronics je tvořen těmito komponentami:

- základní vrstvou epoxydové pryskyřice nanesené na sledovaný povrch,
- želatinovými mikroglobulemi o průměru 250 – 500  $\mu\text{m}$  naplněnými černou, elektricky vodivou kapalinou, které se vmíchají do nanesené pryskyřice,
- vodivým stříbrným nátěrem naneseným na pryskyřici, který je spojen s elektrickým vodičem připojeným přes megohmmetr na vyšetřované těleso, (Obr. 10.15a).



Obr. 10.15

Jestliže se pod nátěrem iniciuje a začne šířit trhlina, pak tento proces sleduje i nanesený nátěr. Trhlina se šíří mikroglobulemi, tyto praskají a kapalina z mikroglobulí vytéká do trhliny v materiálu tělesa. Svou vodivostí způsobí kontakt mezi povrchem tělesa a stříbrným nátěrem, Obr. 10.15b. Důsledkem je změna odporu, a to z hodnoty cca  $5 \cdot 10^4 \text{ M}\Omega$  (prakticky nekonečný odpor mezi vodivou vrstvou a povrchem materiálu před porušením) na hodnotu řádově  $2 \text{ M}\Omega$ , což postačuje k indikaci. Současně černá kapalina zbarví stříbrnou vrstvu, takže proces porušení lze sledovat i vizuálně.

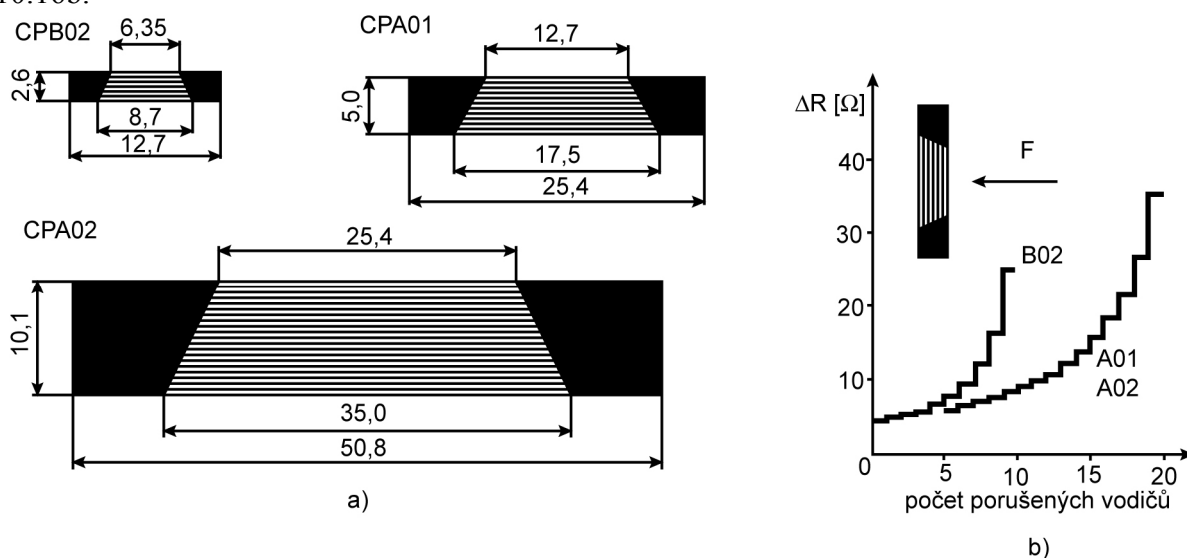
Nátěr je aplikovatelný v rozmezí teplot  $-50$  až  $+80^\circ\text{C}$ , únavová životnost nátěru (kdy v nátěru vznikají trhliny i bez porušení základního materiálu tělesa) je při přetvoření  $\pm 1200$

$\mu\text{m/m}$  větší než  $10^7$  cyklů. Nátěr však praská i bez vzniku trhlin v materiálu tělesa při prodloužení kolem 2,5%. Nátěr je dobře aplikovatelný v laboratorních podmínkách (suchá prostředí), při dobře přístupném povrchu, na horních stranách vodorovných ploch. Degradačními procesy se globule po několika měsících slepují, což znemožňuje jejich použití při vytváření nátěru.

### 10.3 Indikace šíření trhlin foliovými snímači

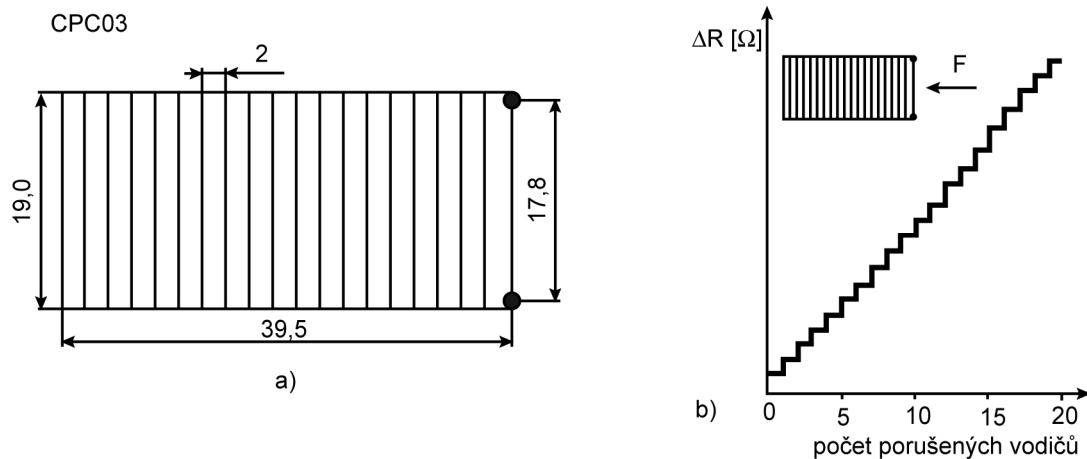
Rychlost šíření trhliny lze sledovat speciálními čidly provedenými jako foliový tenzometrický snímač. Na izolační podložce o tloušťce cca 0,04 mm zhotovené z laminovaného polymeru jsou umístěny paralelní vodiče z odporového materiálu o tloušťce 0,043 mm. Tyto snímače vyrábí firma Micro-Measurement. Jsou schopné sledovat prodloužení do 15%. Jejich únavová životnost při přetvoření  $\pm 2000 \mu\text{m/m}$  je vyšší než  $10^8$  cyklů, rozsah provozních teplot je od  $-268$  do  $+230^\circ\text{C}$ . Komerčně dodávaná provedení jsou zobrazena na Obr. 10.16a.

Jejich aplikace předpokládá znalost směru šíření trhliny. Snímače se pak umísťují tak, aby vodiče byly kolmé na směr šíření trhliny. Pokud se bude trhlina šířit přes snímač, bude se postupně porušovat jeden vodič za druhým a snímač jako celek bude skokově měnit svůj odpor. Registrace změny odporu se provádí v souladu s předpokládanou rychlostí šíření trhliny - od ručního měření odporu přes zapisovače a osciloskopy až po záznam na magnetickou pásku. Změny odporů pro snímače typů CPA01, CPA02 a CPB02 jsou na Obr. 10.16b.



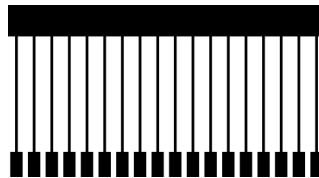
Obr. 10.16

Je vyráběno i provedení snímače u něhož je změna odporu konstantní po každém přerušeném vodiči. Dosáhne se toho tím, že každý vodič má odlišný průřez. Tyto snímače mají označení CPCO3 (Obr. 10.17a). Jejich odporová charakteristika je na Obr. 10.17b.



Obr. 10.17

Jestliže je potřebné indikovat každé vinutí samostatně, je možno použít snímače, u nichž má každý vodič zvláštní vývod, Obr. 10.18.



Obr. 10.18

#### 10.4 Základy fraktografie

Fraktografie se zabývá studiem vlastností lomových ploch vzniklých šířením trhlin v reálných materiálech. Je důležitou součástí teorie mezních stavů a umožňuje:

- posuzovat příčiny vzniklých trhlin a lomu, charakter a úroveň nominálních a lokálních napětí, charakter a časový průběh lomových procesů a jejich důsledky pro chování celé konstrukce,
- identifikovat nebezpečná místa konstrukce,
- hodnotit reálné vlastnosti materiálu z lomového hlediska a zbytkovou životnost konstrukce,
- odstraňovat konstrukční, technologické, výrobní a provozní závady vedoucí k systematickým lomům.

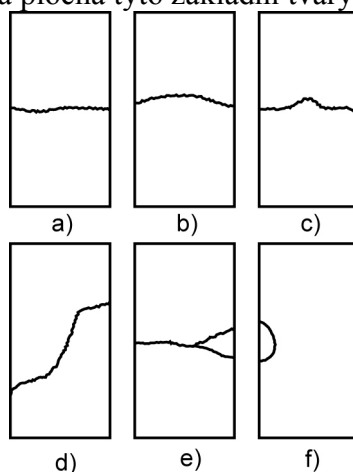
Lomové plochy, obdobně jako lomové procesy, mohou být vyšetřovány z hlediska mikroskopického (mikrofraktografie) a makroskopického (makrofraktografie).

**Mikrofraktografie** se zabývá metalografickým vyšetřováním lomové plochy a jejího okolí. Zabývá se studiem vzniku poruch celistvosti materiálu a průběhu lomové plochy ve vztahu ke strukturním charakteristikám materiálu (typ, tvar a velikost zrn, charakter hranic, čistota, atomová struktura, atd.) s využitím metalografických a fyzikálních metod (optická a elektronová mikroskopie, mikrorentgen atd.). Mikrofraktografie je vždy náročná a provádí se obvykle jen při rozboru a hledání příčin lomu s vážnými následky.

**Makrofraktografický** rozbor vyšetřuje geometrii, reliéf a charakter lomové plochy. Nevyžaduje náročné přístroje a často stačí jen podrobná vizuální prohlídka a kvalitativní posouzení lomové plochy. Již tyto údaje mohou znamenat důležité informace, které umožní analyzovat příčiny lomu a rekonstruovat jeho průběh. Uvedme nyní několik základních makrofraktografických znaků lomových ploch.

Lomová plocha v tělese, u kterého nedochází k výrazným plastickým deformacím v makroobjemech, se šíří kolmo na směr největšího tahového hlavního napětí v daném místě.

Takto nastává šíření trhlin u součástí stroji, kde z funkčních důvodů nepřipouštíme velké globální plastické deformace. Směr šíření je dán tvarem a zatížením tělesa, které určuje nominální napjatost, koncentrátory napětí určujícími lokální napjatost, tvarem, velikostí a plochou trhliny, která určuje napjatost v okolí kořene trhliny, kde nastane šíření. Makroskopicky může mít lomová plocha tyto základní tvary (Obr. 10.19):

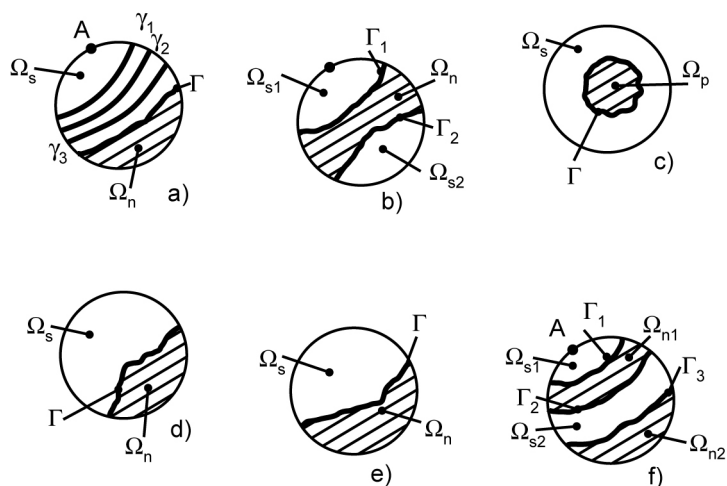


Obr. 10.19

- **rovinná** - (Obr. 10.19a) - homogenní charakter napjatosti (směry 1, 2, 3, hlavních napětí  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  jsou ve všech bodech tělesa stejné),
- **globálně zakřivená** - (Obr. 10.19b) – nehomogenní charakter nominální napjatosti,
- **lokálně zakřivená** - (Obr. 10.19c) - nehomogenní charakter lokální napjatosti způsobený koncentrátorem napětí (vrub, nehomogenita nebo defekt materiálu, atd.),
- **se zlomem** - (Obr. 10.19d) - během života trhliny došlo k náhlé změně charakteru zatěžování (např. trhlina vznikla a částečně se šířila v průběhu výroby součásti, šíření téže trhliny pokračovalo při provozním zatěžování, které má zcela jiný charakter než zatížení v průběhu výroby),
- **rozvětvené** - (Obr. 10.19e) - nestabilní šíření a velkým množstvím energie uvolňované šířením trhliny,
- **lokální** - (Obr. 10.19f) - lomová plocha odděluje malý objem tělesa ve srovnání a objemem celkovým (např. lom při kontaktní únavě).

Na lomové ploše o celkové velikosti  $S$  je možné již při vizuální kontrole **rozlišit**:

- místo  $A$ , ve kterém došlo ke **vzniku** počáteční **makrotrhliny** schopné za daných podmínek šíření,
- části  $\Omega_s$  velikosti  $S_s$  odpovídající **stabilnímu** šíření trhliny; přitom čím pomaleji se trhlina šíří, tím relativně hladší je povrch lomu. Za jistých podmínek má tento lom lasturovitý charakter,
- části  $\Omega_n$  velikosti  $S_n$  odpovídající **nestabilnímu** šíření a vyznačující se krystalickou strukturou,
- rozhraní  $\Gamma$  oddělující části  $\Omega_s$  a  $\Omega_n$ . Rozhraní může mít opět různý charakter, jak je schematicky uvedeno na Obr. 10.20,
- rozhraní  $\gamma$  oddělující jednotlivé lasturovitě oblasti v  $\Omega_s$  (Obr. 10.20a).



Obr. 10.20

Některé základní závěry vyplývající z uvedených makrofraktografických znaků lomových ploch jsou:

- Poloha místa A ve vztahu ke geometrii povrchu, místnímu stavu materiálu a místnímu zatížení odhaluje příčinu vzniku makrotrhliny schopné šíření (nevhodný konstrukční vrub, vada materiálu, vysoké místní napětí atd.). Ve většině případů je A na povrchu tělesa.
- Část  $\Omega_n$  je jednoduše souvislá (Obr. 10.20a-e) - zatěžování bylo kvazistatické. Poměr

$$\mu = \frac{S_s}{S_n} = \frac{S_s}{S - S_s} \quad \mu \in \langle 0, \infty \rangle$$

ukazuje na úroveň nominálních a lokálních napětí. Je-li  $\mu$  velké, byla úroveň nominálních napětí nízká a šíření probíhalo v důsledku vysokých koncentrací napětí. Je-li  $\mu$  malá, pak nominální napětí byla vysoká a vedla ke vzniku lomu.

- Část  $\Omega_n$  je vícenásobně souvislá (Obr. 10.20f) - střídaly se fáze stabilního a nestabilního šíření (např. při kvazistatickém zatěžování s rázovým přetěžováním).
- Z tvaru části  $\Omega_s$  a  $\Omega_n$  můžeme usuzovat na charakter namáhání. Pro ilustraci jsou na Obr. 10.20 a,b,c uvedeny oblasti  $\Omega_s$  a  $\Omega_n$  lomové plochy u různých případů ohybu. Obr. 10.20a - ohyb míjivý, Obr. 10.20b - ohyb střídavý, Obr. 10.20c - ohyb za rotace.

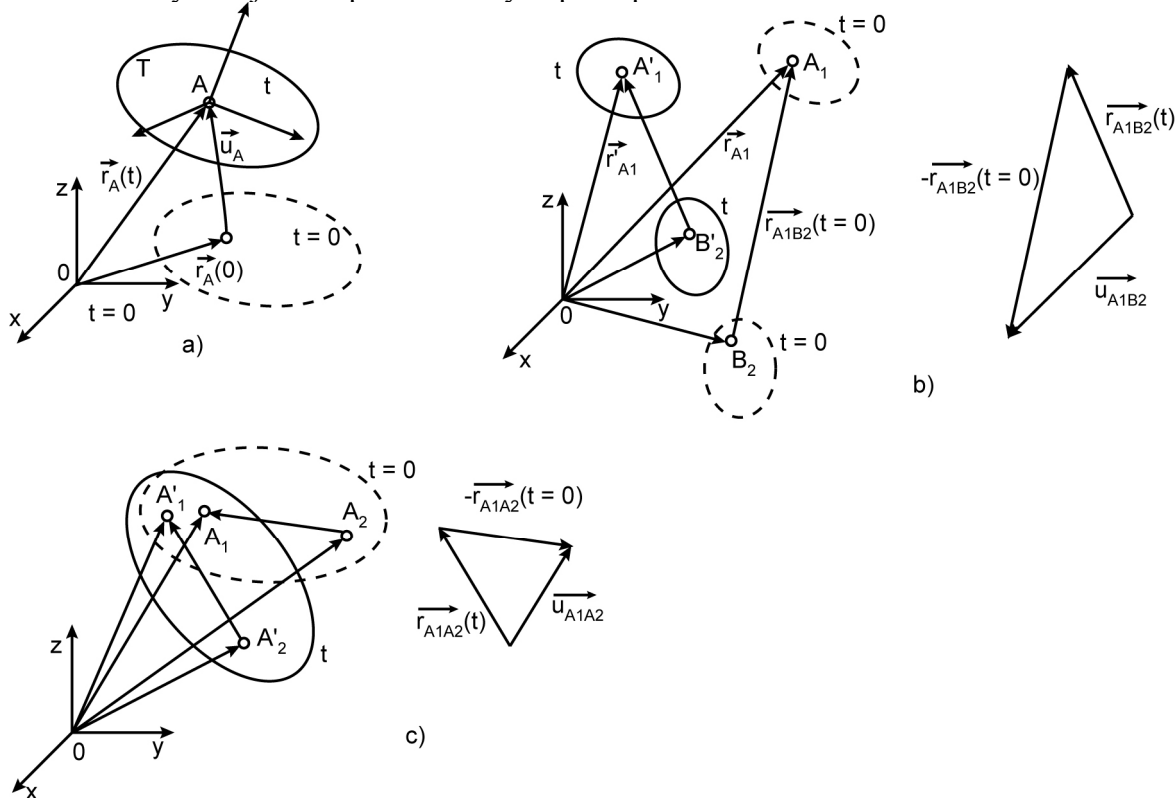
Tyto základní makroskopická znaky lomových ploch mohou objasnit mnoho okolností z historie vzniku lomu.

# 11 Měřicí metody pro určování kinematických veličin

## 11.1 Základní pojmy

Pod pojmem mechanický pohyb označujeme časové změny vzdáleností a úhlů vymezených vzhledem :

- k materiálním objektům v realitě,
- k teoretickým objektům při teoretických přístupech.



Obr. 11.1

Prostředkem tohoto vymezení je základní prvek tělesa, kterým je trojnásobně elementární prvek. Je to ta část tělesa, která je v prostoru na daná rozlišovací úrovni určena geometricky polohovým bivektorem:

$$\vec{r}_A = (x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)_A$$

vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému xyz, kterým definujeme základní (vztažný) prostor, Obr. 11.1a.

Jestliže se polohový bivektor mění v čase, říkáme, že nastává **absolutní pohyb tělesa** (pohyb tělesa vzhledem ke vztažnému prostoru). Je-li tato časová změna bivektoru spojitá, pak vedle něho zavádíme jeho **rychlost** a **zrychlení**.

Za **absolutní kinematické veličiny** pak označujeme:

absolutní posuv:  $\vec{u}_A = \vec{r}_A(t) - \vec{r}_A(0)$

absolutní rychlost:  $\vec{v}_A = \dot{\vec{u}}_A$

absolutní zrychlení:  $\vec{a}_A = \ddot{\vec{u}}_A$  (11.1)

Obdobně zavádíme relativní a deformační kinematické veličiny, vymezené takto:

**Relativní kinematické veličiny** vyjadřují časové změny polohových bivektorů dvou elementárních prvků definovaných na dvou různých tělesech 1, 2 (Obr. 11.1b) a patří k nim:

$$\begin{aligned} \text{relativní posuv:} \quad & \vec{u}_{A_1B_2} = \vec{r}_{A_1B_2}(t) - \vec{r}_{A_1B_2}(t=0) \\ \text{relativní rychlost:} \quad & \vec{v}_{A_1B_2} = \dot{\vec{u}}_{A_1B_2} \\ \text{relativní zrychlení:} \quad & \vec{a}_{A_1B_2} = \ddot{\vec{u}}_{A_1B_2} \end{aligned} \quad (11.2)$$

**Deformační kinematické veličiny** vyjadřují časové změny dvou elementárních prvků definovaných na jediném tělese, Obr. 11.1c. Patří k nim:

$$\begin{aligned} \text{deformační posuv:} \quad & \vec{u}_{A_1A_2} = \vec{r}_{A_1A_2}(t) - \vec{r}_{A_1A_2}(t=0) \\ \text{deformační rychlost:} \quad & \vec{v}_{A_1A_2} = \dot{\vec{u}}_{A_1A_2} \\ \text{deformační zrychlení:} \quad & \vec{a}_{A_1A_2} = \ddot{\vec{u}}_{A_1A_2} \end{aligned} \quad (11.3)$$

Důležitou veličinou jsou **poměrné deformační posuvy** (deformační posuv  $\vec{u}_{A_1A_2}$  vztažený na vzdálenost  $\overline{A_1A_2}$  bodů  $A_1, A_2$ ). V tomto smyslu je poměrný deformační posuv délkovým přetvořením  $\varepsilon$ . K jeho určování lze použít tenzometrické snímače, umožňující měřit časově proměnnou hodnotu  $\varepsilon$ .

Jedním se základních úkolů experimentální mechaniky je určení kinematických veličin elementárních prvků materiálních těles na základě měření. V zásadě se setkáváme s těmito typy úloh:

A. je **zadán elementární prvek na tělese** a mají se určit:

- kinematické veličiny prvku v daném časovém okamžiku,
- časový průběh kinematických veličin prvku a jejich charakteristiky,
- kvalitativní změny časového průběhu kinematických veličin prvku,

B. je **zadáno celé těleso** a mají se určit:

- kinematické veličiny celého tělesa v daném časovém okamžiku,
- časový průběh kinematických veličin celého tělesa a jejich charakteristiky,
- kvalitativní změny časového průběhu kinematických veličin celého tělesa.

Úlohy typu A mají **charakter měření** - je formulován úkol, co se má měřit. Řešení tohoto úkolu spočívá ve volbě vhodného snímače, sestavení měřicího řetězce, realizaci měření a v registraci jeho výsledků v souladu s cílem měření.

Při řešení technických problémů jsou primární úlohy typu B. Jsou to typické **experimentální úlohy**, jejichž základem jsou teoretické znalosti, souvislost mezi řešeným problémem a vlastním měřením typu úlohy A a zpracování výsledků měření tak, aby bylo podkladem pro řešení experimentálního i nadřazeného problému. Řešení úloh typu B vyžaduje:

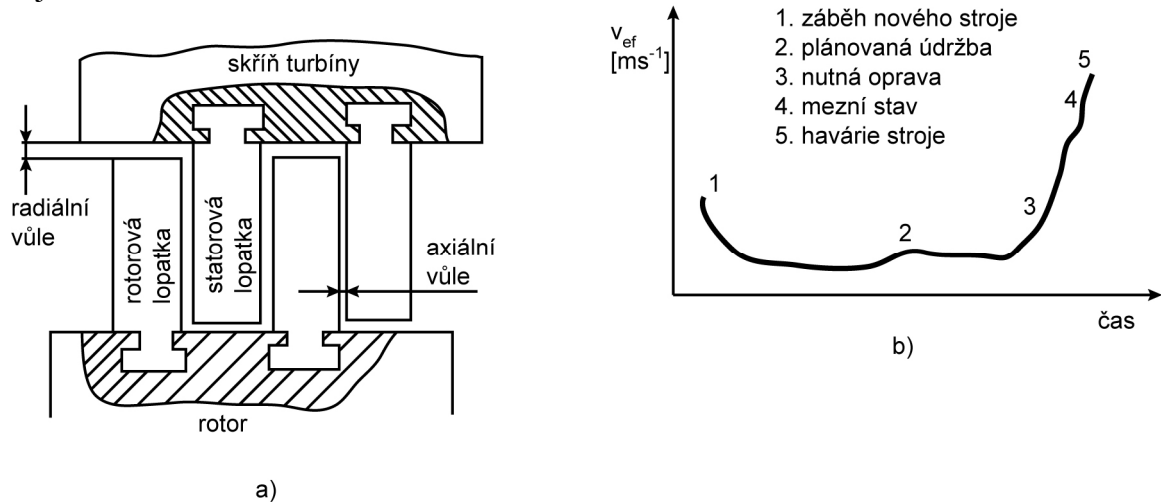
- 1) určit na tělese elementární prvky, v nichž se budou měřit kinematické veličiny, a to z hlediska charakteru problému a z hlediska možné realizace měření (jsou to tzv. **nezávislé prvky** - ostatní prvky tělesa v nichž se neměří jsou **závislé prvky**).
- 2) Vyjádřit závislosti mezi kinematickými veličinami závislých a nezávislých prvků (závislosti umožňují určit kinematické veličiny závislých prvků na kinematických veličinách nezávislých prvků, určených měřením).
- 3) Řešit úlohu A (realizovat vlastní měření) s ohledem na formulovaný experimentální problém.
- 4) Výsledky měření zpracovat z hlediska jejich objektivizace a z hlediska řešení primárního experimentálního problému.



## 11.2 Aplikační oblasti určování kinematických veličin těles.

V předcházejícím odstavci jsme uvedli, že mezi kinematické veličiny popisující mechanický pohyb patří posuv, rychlost a zrychlení, a to ve smyslu absolutním, relativním a deformačním, u nichž vyšetřujeme okamžité hodnoty, jejich časové průběhy, resp. kvalitativní a kvantitativní změny. Měření kinematických veličin představuje velmi rozsáhlou a důležitou oblast technických měření, což dokumentuje následující rozbor.

K významným měřením patří měření absolutních, relativních a deformačních posuvů. Určování absolutních a relativních posuvů je zejména důležité u prvků mnoha mechanických soustav, např. obráběcích strojů, elektrických točivých strojů, lopatkových strojů (turbíny, kompresory,...) apod. Typické jsou např. měření vůlí mezi ložisky a hřídeli, měření změn radiálních a axiálních vůlí u turbin a kompresorů, Obr. 11.2a. Snímače posuvů se dále uplatňují při měření sil. Měření posuvů je ekvivalentní s měřením polohy, takže snímače posuvů mohou mít i funkci vysílačů polohy v měřicí technice pro dálkový přenos údajů u těch přístrojů, jejichž výstupní veličinou je přímočarý nebo rotační pohyb. Snímače deformačních posuvů (tenzometry) nacházejí aplikaci při experimentálním určování sil, momentů, tlaků a určujících veličin kmitání.



Obr. 11.2

Důležitost měření rychlostí a zrychlení těles známe z běžné praxe. Jsou to důležité technické parametry u řady výrobků, např. dopravních prostředků (automobily, letadla, lodě, rakety, ...), s měřením rychlosti těles se setkáváme ve sportu, automobilismu apod. S pojmy okamžitá a střední rychlost a zrychlení, jsme se seznámili již v řadě předmětů během studia a nebudeme je zde opakovat.

Mezi důležité formy mechanického pohybu patří mechanické kmitání těles, vymezené jako forma pohybu, při níž určující veličina pohybu (posuv, rychlost, zrychlení) má mechanický charakter a v závislosti na čase nabývá hodnot větších nebo menších, než je určité rovnovážná hodnota této veličiny. S pojmem mechanické kmitání souvisí i pojem vibrace, kdy jednotlivé body tělesa (elementární prvky) kmitají s různými amplitudami případně i s různými fázemi určující veličiny.

Mechanické kmitání je dnes široce rozpracovaným vědním i technickým oborem, což dokumentuje i následující rozbor druhů kmitání. Podle časového průběhu charakteristické veličiny lze kmitání členit na i deterministické (harmonické, periodické, obecně neperiodické), stochastické (stacionární, nestacionární), seismické, kmitání důsledkem výbuchů. Podle fyzikální podstaty lze rozlišovat: kmitání vlastní, vynucené, samobuzené, kmitání typu flutteru apod. Dále rozeznáváme kmitání podélné, torzní, příčné, krouživé a jejich kombinace, kmitání desek, membrán, skořepin apod. V současné době do kmitání

řadíme i chaotické pohyby.

Jednotlivé typy strojů a zařízení se vyznačují charakteristickými druhy kmitání s charakteristickými frekvencemi. Pro získání informativního přehledu uvádíme základní charakteristiky kmitání u některých typických konstrukčních částí a zařízení.

**Kmitání lopatek a disků** turbin a kompresorů se vyznačuje vysokými frekvencemi (50 až 1000 Hz) s amplitudami 0.1  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$ . Důležitou problematikou je tu zjišťování vlastních frekvencí lopatek a disků při různých tvarech kmitů (ohyb, torze, deskové typy kmitání), které musí být dostatečně vzdáleny od vybuzeného kmitání, daného otáčkami hřídele a počty rotorových a statorových lopatek.

**Kmitání hřídelů. Torzní kmitání** hřídelů je typické pro zalomené hřídele pístových motorů u nichž budící momenty vznikají od nerovnoměrného zatížení v krutu. Kmitání s frekvencemi 10 až 100 Hz se snímá tzv. **torsiometry**. **Krouživé kmitání** spojené s ohybem hřídelů se měří ve dvou vzájemně kolmých směrech, abychom získali představu o pohybu rotoru v rovině kolmé na jeho osu rotace. Krouživé kmitání, které leží nejčastěji v oblastech 20 až 2000 Hz s amplitudami 1 až 50  $\mu\text{m}$ , se určuje většinou nepřímo, a to měřením chvění ložisek.

**Dopravní prostředky** (kolejová vozidla, automobily, ...) mívají základní vlastní frekvence kolem 1 Hz. Kmitání má výrazně náhodný charakter a k jeho vyhodnocování se používá teorie náhodných procesů.

**Kmitání strojů a základů** jako celku je obvykle periodické, posuvné nebo kývavé, s frekvencemi v rozsahu 5 až 50 Hz, s amplitudami od 10 do 1000  $\mu\text{m}$ . Kmitání stavebních konstrukcí (mosty, domy, stožáry) má obvykle nízké frekvence pod 1 Hz, ale s amplitudami do 0,1 m.

**Samobuzené kmitání** (buzení kmitající soustavy vzniká předáváním energie z nepohyblivého zdroje a je řízeno pohybem kmitající soustavy), které se vyskytuje např. u **obráběcích strojů**, u prvků obtékaných tekutinou (sondy v potrubí) nebo u **systémů s třecími prvky** apod., mívají frekvence řádově stovky Hz a jsou obvykle čistě harmonické. Kmitání vyvolaná nestabilitou **regulačních systémů**, pumpáží kompresorů apod., mívají frekvence kolem jednoho Hz. Speciálním případem je samobuzené kmitání, mezi něž patří tzv. flutter lopatek, křídel a ocasních ploch letadel.

V souvislosti s kontrolou atomových výbuchů se rozvíjí obor zabývající se kmitáním zemské kůry v důsledku atomových výbuchů. Měření kinematických veličin není samoučelnou činností, ale souvisí s různými technickými problémy – např. s ověřením garantovaných parametrů (např. rychlosti a zrychlení dopravních prostředků), zejména však a problémy mezních stavů konstrukcí, s ekologickými a fyziologickými problémy.

Principiální význam má měření kinematických veličin ve **vibrodiagnostice**. Spočívá v kontinuálním nebo v intervalovém monitorování parametrů mechanického chvění v určitých charakteristických místech strojů a ve vyvozování závěrů z jejich časových průběhů. Je založena na tom, že změna úrovně parametrů mechanického kmitání je měřítkem změny provozních stavů a vzniku mezních stavů mechanických soustav, Obr. 11.2b.

Z časových průběhů parametrů kmitání lze usuzovat na změnu v nevyváženosti rotorů, na poškození statorových nebo rotorových lopatek lopatkových strojů, na poškození ložisek, ztrátu souososti hřídelů, překročení dovoleného axiálního posuvu u lopatkových nebo elektrických točivých strojů, poškození převodových ústrojí apod. Předností vibrodiagnostiky je, že je bezdemontážní metodou pro určování mechanického stavu mechanické soustavy.

Pro hodnocení mechanických kmitů strojů a strojních zařízení se jako určující veličiny mechanického kmitání často používají:

- **efektivní rychlost kmitání** (při kmitech s frekvencí vyšší než 10 Hz), která je vyjádřena vztahem:

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}, \text{ resp. } v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{mi}^2}$$

kde  $v_{mi}$  jsou amplitudy rychlosti kmitání získané z harmonické analýzy kmitání,  
 $T$  je přiměřený časový úsek,

- **největší hodnota výchylky a kmitočet**,
- **rozkmit** - jako součet absolutních hodnot největších výchylek určující veličiny na obě strany od rovnovážná polohy. U jednoduchého kmitání je rozkmit roven dvojnásobné amplitudě výchylky.

### 11.3 Experimentální řetězec přístrojů pro měření a analýzu mechanického kmitání

Při měření mechanického kmitání je možno měřit některou z veličin, která určují mechanické kmitání, tj. výchylku  $y$ , rychlost  $v$  nebo zrychlení  $a$ , mezi nimiž platí známé vztahy z kinematiky:

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad v = \frac{dy}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}$$

Protože derivace a integrace jsou dnes snadno realizovatelné, stačí snímat pouze jednu z určujících veličin  $y$ ,  $v$ ,  $a$  kmitání a ostatní veličiny pak z ní odvodit. Pro volbu, která z uvedených veličin se bude měřit a které se budou z měřená veličiny odvozovat, neexistují obecně platná kritéria, pouze doporučení vyplývající z rozborů měření kmitání a z praktických aplikací.

Výchylka zdůrazňuje vliv složek s nízkými kmitočty a je měřenou veličinou tehdy, když je nutné uvažovat malé vůle mezi pohybuujícími a nepohybuujícími se součástmi. Dobře charakterizuje i nevyváženost otáčivých částí strojů. Při měření mechanického kmitání s vysokými frekvencemi je výhodné za výchozí měřenou veličinu volit zrychlení. Měření mechanického kmitání je tedy vždy vztaženo k určité určující veličině. Na této veličině a na cíli měření bude pak záležet způsob zpracování měřeného signálu a tím i skladba experimentálního řetězce.

Mechanické kmitání strojních soustav bývá složeno z celé řady složek různých kmitočtů. Z hlediska řešeného problému nás však obvykle zajímá jen určitý typ složky, takže ostatní je třeba odfiltrovat, zkoumanou složku zesílit a určitým způsobem zpracovat. To vede k tomu, že experimentální řetězec je složitou soustavou přístrojů, jak je naznačeno na Obr. 11.3.

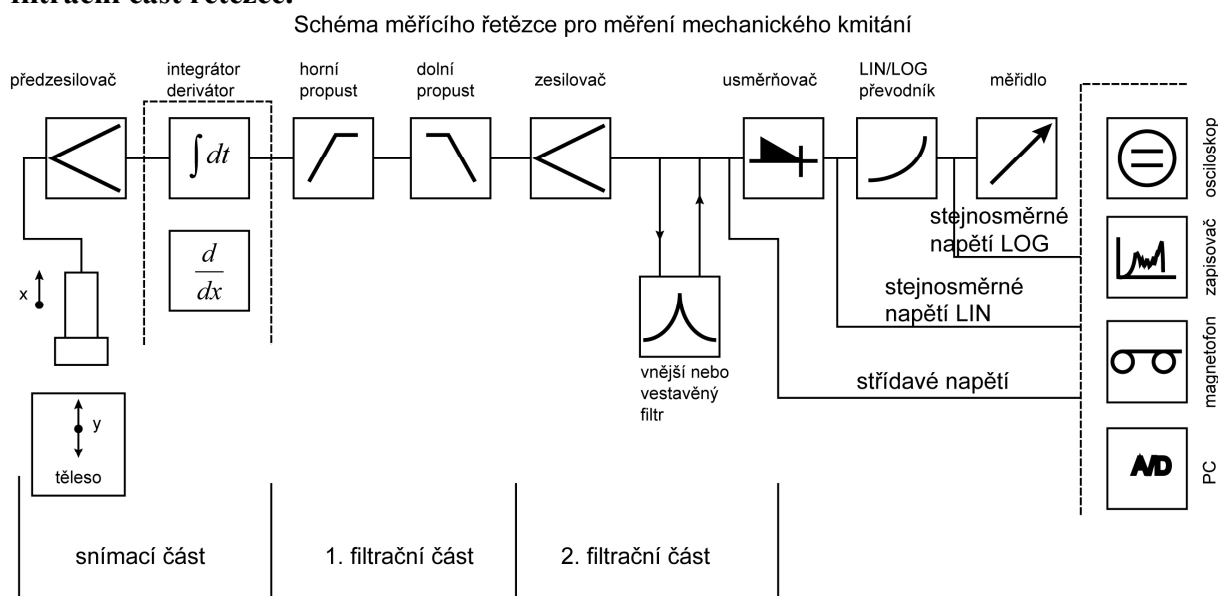
První člen řetězce je **snímač** mechanického kmitání. Volba typu snímače závisí na typu kmitání, jeho frekvenci včetně vyšších harmonických složek a podle typu stroje na němž se provádí. Snímač je jednoúčelový přístroj, který převádí některou určující veličinu mechanického kmitání na jinou, vhodnou a dobře zpracovatelnou veličinu. Tou je dnes převážně veličina elektrická. Problematice snímačů budou věnovány další odstavce.

Jestliže se použije snímač s elektrickým měničem, pak se elektrický signál nejprve přivádí na **předzesilovač**. Podle typu snímače může předzesilovač pracovat jako zesilovač napětí (např. u elektrodynamických snímačů) nebo jako zesilovač náboje (u piezoelektriokých snímačů). Předzesilovač může být součástí kompaktního měřicího přístroje pro analýzu kmitání nebo může tvořit samostatný přístroj (možnost umístění snímače do malých prostorů a propojení s předzesilovačem pomocí kabelů).

Dalším prvkem řetězce je **integrátor**, který umožňuje provádět a měřeným elektrickým signálem operace jako elektrickou derivaci a integraci a tím převádět měřenou

určující veličinu na jiná určující veličiny. Snímač, předzesilovač a integrátor tvoří v experimentálním řetězci tzv. **snímací část**.

Za snímací částí řetězce bývá obvykle zařazena **hornofrekvenční** a za ní **dolnofrekvenční** propust, které omezují nežádoucí vlivy šumu s vysokými a nízkými kmitočty, dále omezují kmitů vlastní rezonance snímače apod. Jsou nastaveny tak, aby pracovní frekvenční rozsah přístroje odpovídal frekvenčnímu pásmu měřeného kmitání. Je to tzv. **filtrační část řetězce**.



Obr. 11.3

Za tyto propustě bývá zařazen **zesilovač** pro zvýšení úrovně odfiltrovaného měřeného signálu na požadovanou velikost. Z tohoto zesilovače je vyveden výstup střídavého napětí.

Za zesilovačem bývají připojeny vestavěné nebo samostatné **frekvenční filtry**, zejména **pásmové propusti** a **úzkopásmové filtry**, které umožňují frekvenční analýzu měření, resp. výběr určitého typu kmitů z měřeného kmitání.

Signál ze zesilovače je veden na **usměrňovač**, který může vyhodnocovat buď efektivní hodnotu nebo maximální rozkmit měřeného signálu. Bývá vybaven paměťovým obvodem, který zaznamenává maximální hodnoty kmitání. Za usměrňovačem je výstup lineárního stejnosměrného napětí odpovídajícího měřeného signálu.

Usměrněný signál se dále zpracovává v lineárně logaritmickém převodníku, za nímž je výstup logaritmického stejnosměrného napětí. Na výstup tohoto převodníku bývá připojeno indikační měřidlo s logaritmickou stupnicí.

Výsledný signál je dále zviditelňován nebo zaznamenáván na řadě univerzálních přístrojů. Elektrický spojitý signál může být transformován do číslicové formy pomocí analogově-digitálního konvertoru (ADC) a pak ukládán do paměti počítače pro další zpracování.

Každý z uvedených přístrojů experimentálního řetězce má jistou citlivost a jistý pracovní frekvenční rozsah. Výsledná citlivost řetězce je dána poměrem hodnoty výstupní veličiny (údaj registračního přístroje) a hodnoty vstupní veličiny (hodnota určující veličiny kmitání). Jelikož se jedná o sériově zapojený řetězec, pak výsledná citlivost je dána součinem dílčích citlivostí jednotlivých prvků řetězce.

Výsledný použitelný frekvenční rozsah řetězce je dán nejnižší horní hranicí a nejvyšší spodní hranicí frekvenčního rozsahu jednotlivých prvků řetězce.

Citlivost prvků soustavy a jejich frekvenční rozsahy lze informativně získat z dokumentace. Jelikož stav přístrojů se může časem měnit, přístroje se mohou vzájemně ovlivňovat,

doporučuje se provádět kalibraci experimentálního řetězce jako celku a pak kalibraci před vlastním měřením kmitání.

### 11.4 Snímače mechanického kmitání

Vlastnosti snímače rozhodujícím způsobem určují přesnost a správnost výsledků měření mechanického kmitání - proto jim budeme věnovat větší pozornost, než jiným prvkům měřicího řetězce. Snímač mechanického kmitání se skládá:

- z **čidla** - je to část snímače, která reaguje na časový průběh měřené veličiny,
- z **měníče - převodníku**, v němž se mechanický pohyb čidla mění na vhodný signál určité fyzikální povahy (mechanické, optické, elektrické, ...).

**Snímače mechanického kmitání lze členit podle rušných kritérií.**

a) Podle **funkce a konstrukce čidla** členíme snímače na:

- **absolutní** - měří určující veličinu mechanického kmitání vzhledem k referenční setrvačné (seismické) soustavě. Používají se tam, kde není k dispozici vhodný pevný bod k upevnění snímače (velké motory, ložiskové skříně, jedoucí vozidla apod.),
- **relativní** - měří určující veličinu mechanického kmitání vzhledem k libovolnému bodu prostoru. Používají se u menších strojů a v případech, kdy se vyhodnocuje kmitavý pohyb jedné části stroje vzhledem ke druhé části, (např. kmitání hřídele vůči ložisku, ...).

b) Podle **principu měniče** - na mechanická, optická, elektrická, ...

c) Podle **pracovní funkce elektrického měniče** na:

- **aktivní** snímače (měniče) - u nichž práce mechanická síly působící na posuvu snímače se mění na energii elektrického signálu. Tyto snímače pracují jako generátory elektrického napětí (náboje, proudu). Nejčastěji používané aktivní snímače pracují na principu elektrodynamickém, elektromagnetickém, magnetostrikčním, piezoelektrickém, na principu vířivých proudů apod,
- **pasivní** snímače - (parametrické snímače, modulátory) potřebují pro svou funkci napájecí zdroj stejnosměrného nebo střídavého proudu. Změna určující veličiny mechanického kmitání způsobí úměrnou změnu napětí nebo proudu protékajícího obvodem. Umožňují převádět na elektrický signál i velmi pomalé a statické výchylky. Mezi hlavní typy pasivních snímačů patří snímače odporové, indukční, kapacitní, elektrooptické.

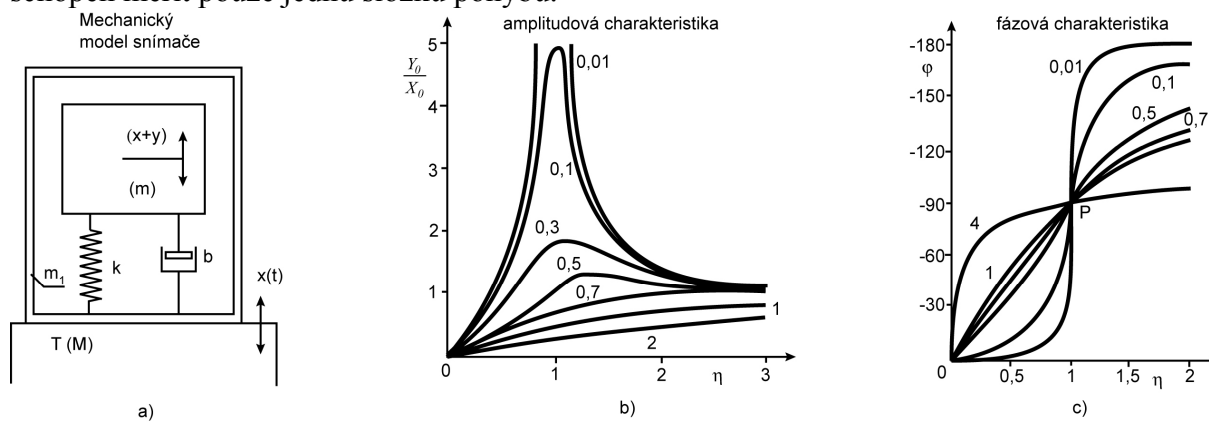
d) Podle toho, zda snímače **jsou nebo nejsou spojená s kmitajícím tělesem** je členíme na **dotykové a bezdotykové**.

Poznání vlastností absolutních a relativních snímačů a fyzikálních vlastností pasivních a aktivních snímačů je předpokladem pro pochopení funkce a možností jednotlivých snímačů. Proto v dalším textu rozebereme poněkud podrobněji problematiku absolutních a relativních snímačů. Z hlediska fyzikálních principů měničů snímačů mají dnes mnohé pouze historický význam (odporové a potenciometrické převody, odporové, elektrolytické) jiné se zase používají méně (magnetostrikční, elektrooptické) a proto se budeme zabývat podrobněji pouze dnes nejpoužívanějšími typy, a to aktivními snímači elektrodynamickými a piezoelektrickými a pasivními snímači indukčnostními a kapacitními.

### 11.5 Princip, teorie a vlastnosti absolutních snímačů

Schéma absolutního snímače kmitání je znázorněno na Obr. 11.4a. Jeho podstatné vlastnosti v potřebném frekvenčním rozsahu je možno vystihnout mechanickým modelem

soustavy s jedním stupněm volnosti, tvořeným setrvačnou hmotou o hmotnosti  $m$  uloženou na pružině s tuhostí  $k$  [ $\text{Nm}^{-1}$ ] a na tlumiči s koeficientem tlumení  $b$  [ $\text{Nm}^{-1}\text{s}$ ]. Tato soustava bývá uzavřena v krytě o hmotnosti  $m_1$ , který se upevňuje na měřená těleso. Snímač je uzpůsoben tak, že hmota  $m$  se může pohybovat jenom v jednom směru, což znamená, že snímač je schopen měřit pouze jednu složku pohybu.



Obr. 11.4

Činnost snímače vyplývá z následující úvahy: jestliže se měřená výchylka  $x(t)$  mění velmi rychle a je-li dostatečně velká hmota  $m$  uložena na měkké pružině (malá tuhost  $k$  pružiny), pak lze pohyb tělesa  $T$  měřit vzhledem k hmotě  $m$ . Hmota  $m$  totiž zůstává prakticky v absolutním klidu a lze ji tedy využít jako pevného bodu, vůči němuž měříme pohyb tělesa  $T$ . Veličina  $x(t)$  pak představuje relativní výchylku mezi hmotou snímače  $m$  a hmotou tělesa  $T$ . Veličina  $[x(t) + y(t)]$  představuje absolutní výchylku snímače. Vztah mezi výchylkou  $y(t)$  snímače a výchylkou  $x(t)$  hmoty  $M$  dostaneme řešením této pohybové rovnice snímače:

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + b\dot{y} + ky = 0 \quad (11.4)$$

Abychom mohli zanedbat vliv hmotnosti snímače na měřenou soustavu, musí být  $m_1 + m \ll M$ . K určení vlastností snímače postačí (vzhledem k platnosti principu superpozice), když budeme uvažovat pouze jednu harmonickou složku měřeného  $x(t)$ , tj. když  $x(t) = X_0 \sin \omega t$ . Po dosazení do (11.4) dostaneme:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = -m\ddot{x} = m\omega^2 X_0 \sin \omega t \quad (11.5)$$

Řešení předpokládáme ve tvaru:

$$y(t) = Y_0 \sin(\omega t - \varphi) = Y_0 (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi) \quad (11.6)$$

Dosadíme-li ho do (11.5), po jednoduchých úpravách dostaneme tuto soustavu rovnic:

$$\begin{aligned} (k - \omega^2 m)Y_0 \cos \varphi + (b\omega)Y_0 \sin \varphi &= \omega^2 mX_0 \\ -(b\omega)Y_0 \cos \varphi + (k - \omega^2 m)Y_0 \sin \varphi &= 0 \end{aligned}$$

Řešením této soustavy obdržíme frekvenční přenos snímače: amplitudovou funkci:

$$\frac{Y_0}{X_0} = \frac{\omega^2 m}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (b\omega)^2}} \quad (11.7)$$

fázový posuv signálů  $x(t)$  vzhledem k  $y(t)$

$$\varphi = \arctg \frac{b\omega}{k - \omega^2 m} \quad (11.8)$$

kde:  $X_0$  je skutečná amplituda kmitání tělesa  $T$ ,  
 $Y_0$  je naměřená amplituda kmitání,  
 $Y_0/X_0$  je citlivost snímače.

**Tyto vztahy upravíme pomocí veličin, které jsme zavedli v dynamice, a to :**

vlastní frekvence snímače:  $\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11.9)$

součinitele kritického tlumení:  $b_k = 2\sqrt{m \cdot k} = m \cdot \Omega_0 \quad (11.10)$

použijeme-li bezrozměrné veličiny:

součinitel naladění:  $\eta = \frac{\omega}{\Omega_0} \quad (11.11)$

poměrný útlum:  $b_r = \frac{b}{b_k} = \frac{b}{2m\Omega_0} \quad (11.12)$

Lze amplitudovou funkci a fázový posuv vyjádřit v bezrozměrném tvaru takto:

$$\frac{X_0}{Y_0} = \frac{\eta^2}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2b_r \eta)^2}} \quad (11.13)$$

$$\varphi = \arctg \frac{2b_r \eta}{1 - \eta^2}$$

Poznámka: určování amplitudové a fázové funkce a charakteristiky patří do problematiky tzv. frekvenčního přenosu.

## Diskuse k důležitým problémům měření kmitání:

### 1. Snímání obecného tvaru kmitání

Z řešení (11.6) je zřejmé, že jednoduchý harmonický pohyb  $x(t)$  tělesa převádí lineární mechanický snímač na měřený údaj  $y(t)$  bez zkreslení tvaru, tj. zachovává jeho harmonický průběh. V případě obecného tvaru měřeného kmitání  $x(t)$ , Obr. 11.5a, požadujeme, aby měřený výstup  $y(t)$ :

- buď byl úměrný vstupu  $x(t)$  s libovolně velkou konstantou  $C$  (Obr. 11.5b,d), tedy

$$y(t) = C \cdot x(t)$$

- nebo byl alespoň úměrný časově posunutému signálu  $x(t)$  (Obr. 11.5c), tedy

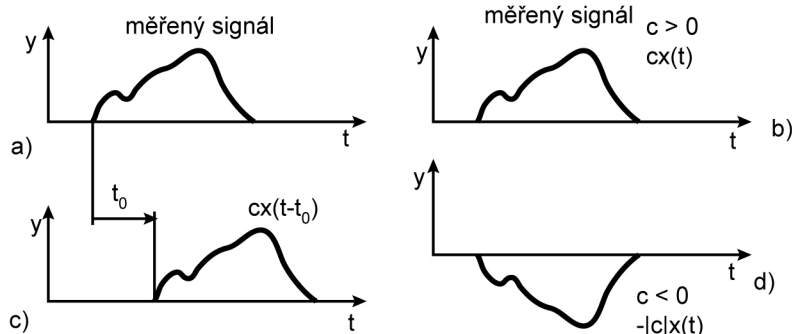
$$y(t) = C \cdot x(t - t_0)$$

Z těchto dvou vztahů vyplývá:

- všechny harmonické složky obsažené v průběhu  $x(t)$  musí být stejně amplitudově zesíleny, což znamená, že poměr  $Y_0/X_0$  musí být konstantní v dostatečně širokém frekvenčním rozsahu  $\omega$ , resp.  $\eta$ ;
- je-li konstanta  $C$  záporná, pak  $y(t)$  a  $x(t)$  mají opačné znaménko - průběhy jsou

naznačeny na Obr. 11.5d. Příklad s  $C < 0$  se považuje za přenos bez zkreslení, protože změnou orientace osy  $y$ , což při elektrickém signálu znamená záměnu vodičů, lze přejít na stejný průběh jako je na Obr. 11.5b;

- za nezkraslený se považuje i fázově posunutý průběh o časový úsek  $t_0$  (Obr. 11.5c). V tomto případě musí být jednotlivé harmonické složky fázově posunuty o úhel úměrný jejich frekvenci.



Obr. 11.5

## 2. Pracovní oblast absolutního snímače výchylky

Z průběhů amplitudové charakteristiky  $Y_0/X_0$  a fázového posuvu signálů  $\varphi$  na Obr. 11.4b,c, lze z hlediska požadavků na nezkraslený přenos signálu ( $Y_0/X_0 \rightarrow 1, \varphi = 0, \text{ resp. } \varphi = \pi$ ) vyslovit tato konstatování:

- jediný širší frekvenční rozsah, ve kterém se obecný periodický signál zkraslí minimálně, leží v nadrezonanční oblasti snímače ( $\eta > 1, \text{ tj. } \omega > \Omega_0$ , kde  $Y_0/X_0 \rightarrow 1, \varphi \rightarrow \pi$  a tedy  $y(t) = (-1) \cdot x(t)$ ). V této oblasti lze volbou tlumení  $b_r \in (0,5 \div 0,7)$  dosáhnout, že dynamické zkraslení amplitud je velmi malé, poměr  $Y_0/X_0$  zhruba konstantní a blízký jedné. Minimální fázové zkraslení v oblasti  $\eta > 1$  dostaneme zase pro velmi malé tlumení ( $b_r \rightarrow 0$ ), kdy fázový posuv je prakticky roven  $\pi$ . Lze tedy konstatovat, že požadavky na velikost tlumení, má-li současně zajišťovat minimální amplitudové i fázové zkraslení, jsou protichůdné a je nutné hledat kompromisní řešení s přihlédnutím na cíl měření. Absolutní snímač výchylek musí tedy pracovat v nadrezonanční oblasti. Chceme-li měřit střídavé výchylky při nízkých frekvencích, pak je nutné, aby snímač měl co nejnižší vlastní frekvenci  $\Omega_0 = \sqrt{k/m}$  - proto velké  $m$  a malé  $k$ . Hodnota  $\Omega_0$ , bývá v rozsahu 2 až 10 Hz. Horní hranice frekvenčního rozsahu bývá kolem 1000 Hz - je limitována rozkmitáním vodičích prvků a pružin, resp. příčným rozkmitáním soustavy.

## 3. Pracovní oblast absolutního snímače zrychlení

Pro snímač zrychlení platí stejná pohybová rovnice (11.4), takže je stejné i řešení (11.6), (11.7). Amplitudovou funkci je však nutno upravit jako poměr údaje snímače  $Y_0$  k amplitudě zrychlení  $X_0\omega^2$ , tedy:

$$\frac{y}{\ddot{x}} \approx \frac{Y_0}{X_0\omega^2} = \frac{m}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (b\omega)^2}} = \frac{m}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2b_r\eta)^2}} \quad (11.14)$$

Fázový posuv je dán druhým vztahem (11.7). Z průběhu amplitudové charakteristiky na Obr. 11.6 je zřejmé, že nejmenší amplitudové zkraslení je v oblasti  $\eta < 1$ , a to pro tlumení  $b_r = (0,5 \div 0,7)$ . Konstanta úměrnosti (citlivost) mechanické části při nízkém naladění  $\eta < 1$  je



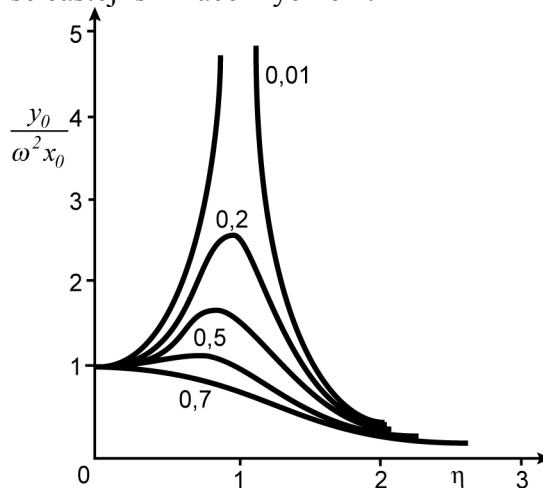
$Y_0 / (X_0 \omega^2) = m / k$  a odchylky od této konstanty jsou jen několik procent. Úhel fázového posunutí  $\varphi$  je v oblasti  $\eta < 1$  přibližně úměrný frekvenci  $\omega$  (viz Obr. 11.4c). Nahradíme-li v oblasti  $\eta \in (0, 1)$  závislost  $\varphi_p = \varphi(\eta)$  přímkou jdoucí počátkem souřadnicového systému a bodem P  $[\pi/2, 1]$ , pak časové zpoždění  $\varphi$  je pro  $br = 0,7$  dáno vztahem:

$$t_0 = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{T}{4} \quad (11.15)$$

a je tedy rovno čtvrtině periody vlastních kmitů snímače.

Lze tedy konstatovat, že pro minimální amplitudové i fázové zkreslení je nutné, aby snímač zrychlení pracoval v podrezonanční oblasti. Má-li být pracovní oblast snímače co největší, pak je nutné, aby snímač měl vysokou vlastní frekvenci  $\Omega_0 = \sqrt{k/m}$ , (řádově desítky kHz). To lze splnit zmenšováním hmoty  $m$  a zvyšováním tuhosti pružiny  $k$ . Zvyšování  $k$  však způsobuje zmenšování citlivosti snímače  $Y_0/X_0$ . Vyhovět tedy současně požadavku vysoké vlastní frekvence i vysoká citlivosti nelze, zejména ne u mechanických snímačů. To je jeden z důvodů, proč se používají piezoelektrické snímače zrychlení.

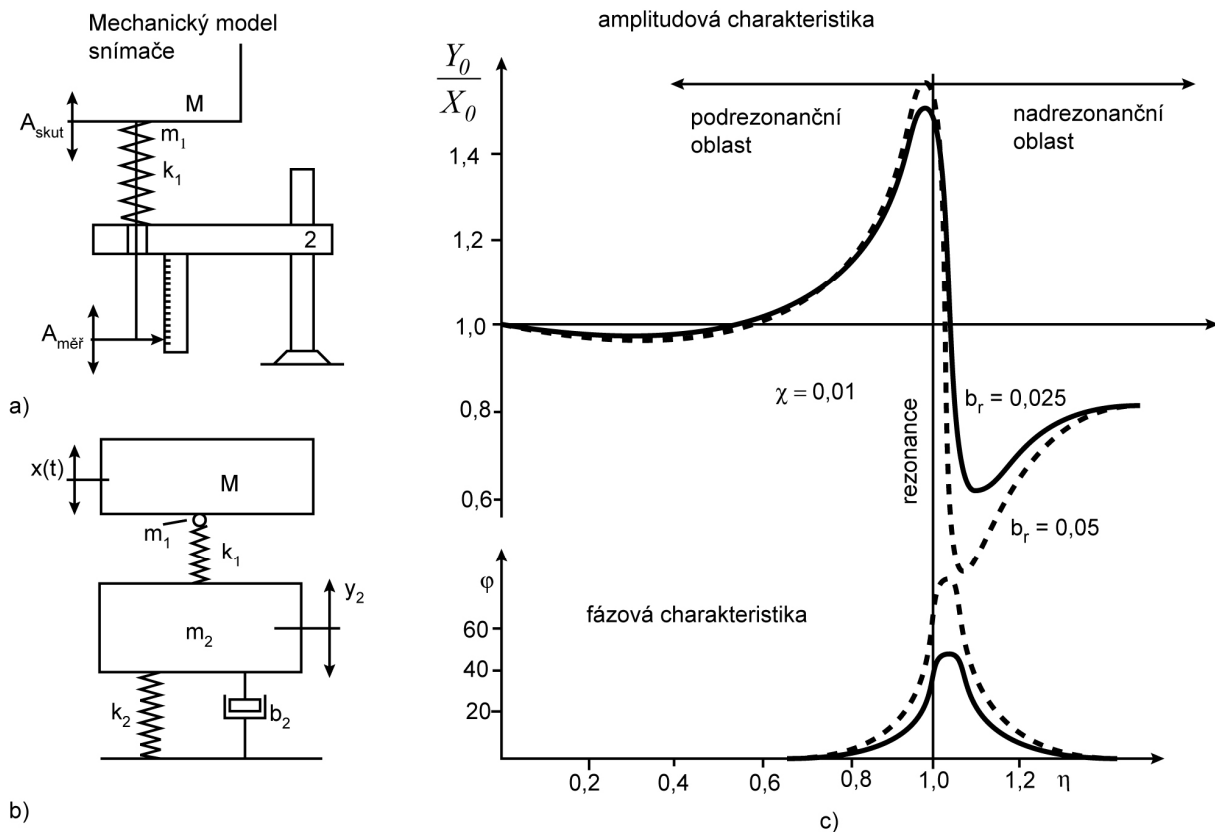
Nyní k problému, co je vhodnější - zda měřit výchylky mechanických kmitů a rychlost zrychlení provádět elektrickou derivací, nebo měřit zrychlení a rychlosti a výchylky získat elektrickou integrací? Poněvadž snímač zrychlení má širší pracovní rozsah, menší amplitudové i fázové zkreslení než snímač odchylek a taktéž jeho rozměry a hmotnost mohou být velmi malé, používají se častěji snímače zrychlení.



Obr. 11.6

## 11.6 Princip, teorie a vlastnosti relativních snímačů

Relativní snímače kmitání se používají pro měření relativního pohybu  $x_r = x_B - x_A$  dvou bodů kmitající soustavy. Těleso snímače 2 (Obr. 11.7) se upevňuje na tu část  $A$  soustavy, která je hmotnější a koná menší pohyb než druhá část soustavy  $B$ . Dotyková část 1 snímače se opírá o měřenou část soustavy  $B$ . Relativní snímač může být řešen i jako bezdotykový, kdy změna vzdálenosti 2 -  $B$  při kmitání je přímo měřena na elektrický nebo jiný signál. Lze ho též použít i jako snímače absolutního pohybu, je-li v blízkosti měřeného tělesa pevné místo, na které lze uchytit těleso snímače nebo jeho držák. Relativní pohyb vyšetřovaného tělesa vůči místu upevnění držáku je pak totožný s absolutním pohybem měřeného místa.



Obr. 11.7

Pro rozbor amplitudového a fázového zkreslení použijeme mechanický model snímače, dle Obr. 11.7a. Relativní snímač je tvořen dotykovým prvkem o hmotnosti  $m_1$ , přitlačovaným pružinou o tuhosti  $k_1$  k měřenému objektu. Těleso snímače 2 spolu s držákem lze znázornit hmotou  $m_2$ , tuhostí  $k_2$  přičemž  $k_2 \gg k_1$ , a lineárním tlumičem s koeficientem tlumení  $b_2$ . Pohybová rovnice hmoty  $m_2$  má tvar:

$$m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 + k_1 (y_2 - x) = 0 \quad (11.16)$$

Relativní výchylku  $y_1$ , úměrnou údajům snímače, vyjádříme jako rozdíl  $y_1 = x - y_2$ . Dosadíme-li do rovnice (11.16) za  $y_2 = x - y_1$  dostaneme :

$$m_2 (\ddot{x} - \ddot{y}_1) + b_2 (\dot{x} - \dot{y}_1) + k_2 (x - y_1) - k_1 y_1 = 0$$

případně:

$$m_2 \ddot{y}_1 + b_2 \dot{y}_1 + (k_1 + k_2) y_1 = m_2 \ddot{x} + b_2 \dot{x} + k_2 x \quad (11.17)$$

**Obdobným postupem jako v případě absolutního snímače pro harmonický pohyb tělesa M dostaneme amplitudovou funkci ve tvaru:**

$$\frac{Y_0}{X_0 \omega^2} = \frac{\sqrt{(k_2 - \omega^2 m_2)^2 + (b_2 \omega)^2}}{\sqrt{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_2)^2 + (b_2 \omega)^2}} \quad (11.18)$$

a velikost fázového posunu:

$$\psi = (\nu - \varphi) = \arctg \frac{b_2 \omega}{k_2 - \omega^2 m_2} - \arctg \frac{b_2 \omega}{(k_1 + k_2) - \omega^2 m_2} \quad (11.19)$$

Zavedeme-li bezrozměrné veličiny, obdobně jako u absolutního snímače:

koeficient naladění:  $\eta = \frac{\omega}{\Omega_0} = \omega \sqrt{\frac{m_2}{k_2}}$

poměrný útlum:  $b_r = \frac{b_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}$

poměr tuhostí:  $\chi = \frac{k_1}{k_2}$

lze vztahy (11.18) a (11.19) upravit do tvaru:

$$\frac{Y_0}{X_0} = \sqrt{\frac{(1-\eta^2)^2 + (2b_r\eta)^2}{(1+\chi-\eta^2)^2 + (2b_r\eta)^2}} \quad (11.20)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2\chi b_r \eta}{(1+\chi-\eta^2)(1-\eta^2) + (2b_r\eta)^2}$$

Závislosti (11.18) a (11.19) jsou pro  $\chi = 0,01$  (měkký snímač na tuhém držáku) a pro  $b_r = 0,025$  a  $0,05$  (poměrně malé tlumení držáku) znázorněny na Obr. 11.7c. Z těchto závislostí lze konstatovat:

- v podrezonanční oblasti je frekvenční funkce amplitudového zesílení  $Y_0/X_0$  prakticky konstantní a rovna jedné. Znamená to, že relativní snímač umožňuje měřit velmi pomalé kmitání i statické výchylky
- fázové posunutí je nulové od  $\eta = 0$ , přibližné do  $\eta = 0,8$
- v okolí hodnoty  $\eta = 1$  ( $\omega = \Omega_0$ ) jsou odchylky od  $Y_0/X_0 = \text{konst.}$  a  $\varphi = 0$  tím menší, čím je menší poměr  $\chi$  (tuhosti  $k_1$  pohyblivé části snímače k tuhosti  $k_2$  upnutí snímače). Odchylky frekvenční charakteristiky od konstantní hodnoty významně snižuje tlumení držáku. Při malém  $\chi$  stačí i docela malé tlumení ( $b_r = 0,05 \div 0,1$ ), aby frekvenční charakteristika byla plochá a  $\varphi \doteq 0$ .

Souhrnně lze konstatovat, že vhodně volenými parametry (tuhost a tlumení držáku) lze dosáhnout, že relativní snímače lze použít v rezonanční i nadrezonanční oblasti. Relativní snímač je vhodný pouze pro měření výchylek, nikoliv zrychlení.

## 11.7 Princip a teorie mechanického měřice frekvencí

Z dosavadního výkladu je zřejmé, že pracovní oblast absolutního snímače kmitů je nadrezonanční, snímače zrychlení podrezonanční; stejně tak je tomu u relativního snímače kmitů. V oblasti rezonance ( $\omega = \Omega_0$ ) dochází u uvedených snímačů k výraznému amplitudovému zkreslení. Pro oblast strojírenství je však důležité znát jak rezonanční frekvenci  $\Omega_0$  tak i velikost amplitud v rezonanční oblasti. K určení těchto veličin je vhodný tzv. **mechanický snímač frekvencí**, jehož schéma je na Obr. 11.8. Jde o horizontální kyvadlo, skládající se z tyče, z posuvného závaží a soustavy pružin. Tento přístroj je pevně spojen s prostředím jehož dynamické vlastnosti vyšetřujeme. Pohybová rovnice kyvadla je:

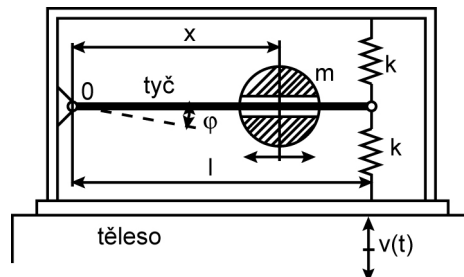
$$mx^2\ddot{\varphi} + kl^2\varphi = -m\omega v_0 \cos \omega t$$

Po řešení  $\varphi(t) = Y_0 \cos \omega t$  dostaneme  $Y_0(\omega) = -\frac{m\omega v_0}{kl^2 - m\omega^2 x^2}$  (11.21)

Z tohoto výrazu je zřejmé, že amplituda odezvy  $Y_0$  poroste nad všechny meze, když bude:

$$\omega = \Omega_0 = \frac{l}{x} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11.22)$$

tedy nastane-li **rezonance**. V důsledku tlumení bude hodnota veličiny konečná. Frekvenci  $\Omega_0$  zjišťujeme tak, že se plynule pohybuje hmotou po tyči a zjišťuje se vzdálenost  $x_m$ , kdy výchylka  $\varphi(t)$  je maximální. Pro zjištění  $x_m$  lze pak ze vztahu (11.22) určit vlastní frekvenci tělesa  $\Omega_0$ .



Obr. 11.8

## 11.8 Teorie a provedení nejpoužívanějších snímačů kmitání

V odst. 4 jsme uvedli typy aktivních a pasivních snímačů z hlediska fyzikálních principů jejich měničů. Uvedli jsme, že řada z nich se již prakticky nepoužívá a některé typy jen zřídka. Proto se v tomto odstavci budeme detailněji zabývat pouze elektrodynamickými, piezoelektrickými, indukčnostními a kapacitními snímači.

Poněvadž tyto typy měničů se používají i při měření sil a tlaků, rozebereme poněkud detailněji i teorii jejich fyzikálních principů. V závěru tohoto odstavce je pojednáno o tenzometrických snímačích kmitání.

### 11.8.1 Elektrodynamické snímače

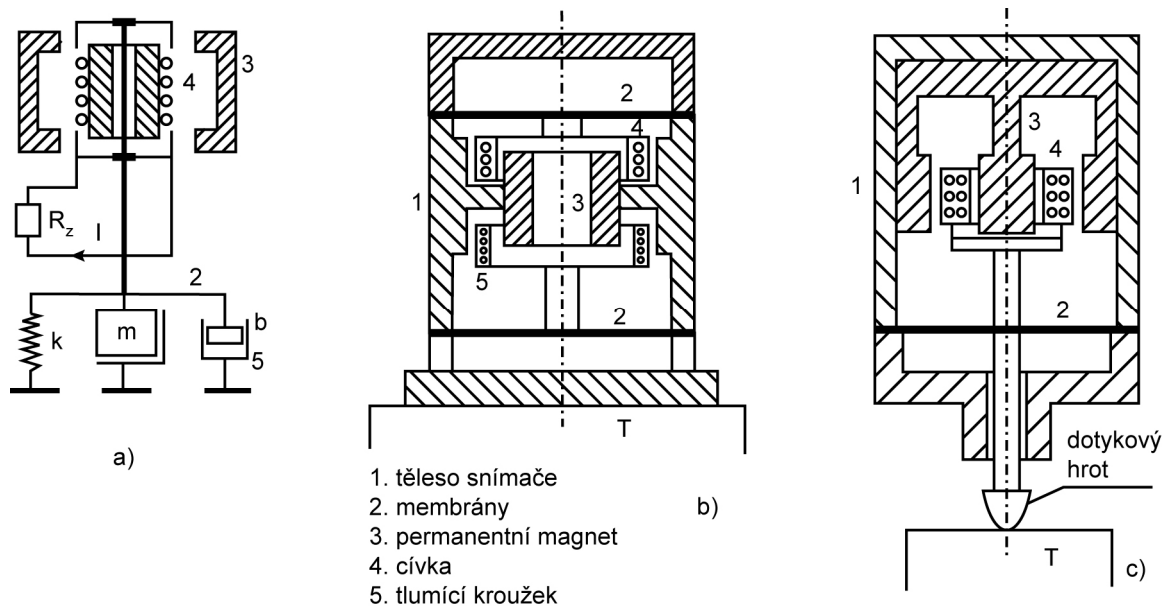
Převodník těchto snímačů pracuje na elektrodynamickém principu. Čidlem snímačů je cívka 4 vedená pružinami a pohybující se v prstencové vzduchové mezeře válcového permanentního magnetu 3, vytvářejícího magnetické pole. Schéma absolutního elektrodynamického snímače je na Obr. 11.9a. Jestliže siločáry homogenního stejnosměrného magnetického pole probíhají ve vzduchové mezeře radiálně k závitům cívky a těmito závity protéká proud  $i$ , působí na cívku převodníku síla  $F = Bli$ . Nastane-li pohyb (posuv  $u$ ) cívky v magnetickém poli, pak se v ní indukuje elektromotorická síla podle vztahu

$$e = n \frac{d\phi}{dt} = Blv_u, \text{ přičemž } v_u = \frac{du}{dt} \quad (11.23)$$

kde:

- $B$  je magnetická indukce ve vzduchové mezeře,
- $l$  délka vodiče cívky,
- $\phi$  magnetický tok,
- $n$  počet závitů cívky,
- $v_u$  rychlost cívky vůči magnetickému poli.

Ze vztahu (11.23) vyplývá, že výstupní elektrické napětí je úměrné rychlosti pohybu cívky. Síla  $F_e$  je přibližně lineární funkcí protékajícího proudu  $i$ .



Obr. 11.9

**Vlastnosti** elektrodynamických snímačů lze shrnout takto:

- jsou to **snímače rychlosti** mechanického kmitání; výchylka kmitání se získá integrací signálu, zrychlení derivací signálu,
- vzhledem k závislosti výstupního elektrického napětí ze snímače na rychlosti kmitání, jsou vhodné pouze pro měření střídavé složky pohybu (od 1 do 1000 Hz),
- nelze tedy zachytit statickou nebo málo proměnnou složku kmitání a nelze je kalibrovat staticky - pouze dynamicky,
- vzhledem k malému vnitřnímu odporu (cca  $50 \Omega$ ) a značné citlivosti (bývá  $20 \text{ mV/mm s}^{-1}$ ) lze signál z cívky vést přímo na registrační nebo ukazovací přístroj,
- jsou citlivé na magnetické pole, teplotu a nárazy.

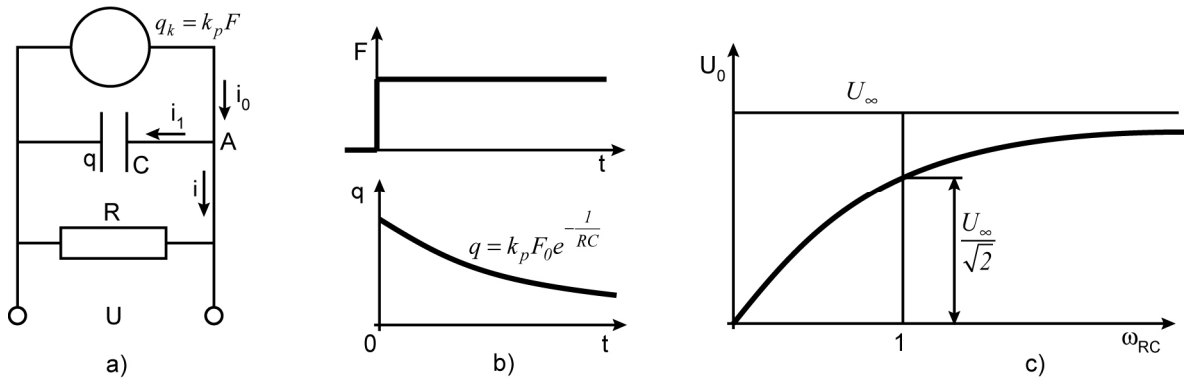
Provedení absolutního snímače u něhož cívka je obvykle spojena se seismickou hmotou 2 a magnet s krytem snímače 1 je znázorněno na Obr. 11.9b. U relativního snímače se cívka pohybuje s měřeným tělesem  $T$ , Obr. 11.9c.

### 11.8.2 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrický měnič je dnes nejrozšířenějším aktivním elektrickým měničem. Čidlem těchto snímačů je krystal materiálu u něhož se projevuje piezoelektrický jev. Jestliže na tento krystal působí síla  $F$ , pak na jeho polepech vzniká elektrický náboj  $q_k$  dle vztahu  $q_k = k_p F$ , kde  $k_p$  je piezoelektrická konstanta materiálu. Jelikož pro sílu  $F$  platí  $F = m\ddot{x}$  a mezi nábojem  $q_k$ , kapacitou krystalu  $C$  a napětím  $U$  na polepech krystalu platí vztah  $q_k = CU$ , lze snadno získat závislost:

$$U = \frac{q_k}{C} = \frac{k_p F}{C} = \frac{k_p m}{C} \ddot{x} \quad (11.24)$$

Napětí  $U$  je tedy přímo úměrné zrychlení  $\ddot{x}$ , takže piezoelektrický snímač pracuje jako snímač zrychlení - akcelerometr.



Obr. 11.10

Vlastnosti snímače lze zjistit řešením **dynamického chování** výpočtového modelu snímače podle schématu na Obr. 11.10a. Označíme-li odpory  $R$  a kapacity  $C$ : u krystalu ( $R_k, C_k$ ), u vodiče ( $R_v, C_v$ ) a u přístroje ( $R_p, C_p$ ), pak pro výsledný odpor  $R$  a výslednou kapacitu  $C$  platí:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_p}}, \quad C = C_k + C_v + C_p$$

Jednotlivé proudy ve větvích schématu na Obr. 11.10a jsou dány vztahy :

$$i_0 = \frac{dq_k}{dt} = k_p \frac{dF}{dt}, \quad i_1 = \frac{dq}{dt}, \quad i = \frac{U}{R}, \quad \text{přičemž } q = CU$$

Dosadíme-li tyto vztahy do Kirchhoffova zákona pro uzel A:  $i_1 + i = i_0$  dostaneme tuto diferenciální rovnici pro elektrický náboj  $q$ :

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = k_p \frac{dF}{dt} \quad (11.25)$$

Určeme nejprve **přechodovou funkci**, kdy síla působící na krystal se skokově změní a pak je časově stálá, Obr. 11.10b, takže její změna pro  $t > 0$  je  $dF/dt = 0$ . Rovnice (11.25) je pak homogenní. Její řešení předpokládejme ve tvaru  $q_1 = C_1 e^{\lambda t}$ . Charakteristická rovnice má pak tvar  $\lambda + \frac{1}{RC} = 0$  a řešením je  $\lambda = -\frac{1}{RC}$ , takže  $q = C e^{-\frac{t}{RC}}$ . Integrační konstantu  $C$ , určíme z počáteční podmínky vyjadřující, že v čase  $t = 0$  se kondenzátor nabije nábojem  $q = k_p F_0$ , takže  $C_1 = k_p F_0$ . Obecný integrál homogenní diferenciální rovnice (11.25) pak je:

$$q = k_p F_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (11.26)$$

Tento vztah popisuje vybíjení náboje kondenzátoru v závislosti na čase (Obr. 11.10b). Pro snímač kmitání je důležitý **frekvenční přenos**, kdy budící síla je časově proměnná. Její harmonický průběh lze popsat vztahem:  $F = F_0 e^{i\omega t}$ . Diferenciální rovnice (11.25) má v tomto případě tvar:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = k_p i\omega F_0 e^{i\omega t} \quad (11.27)$$

Vyřešíme-li partikulární integrál rovnice (11.27) (např. metodou variace konstanty), pak

sečtením a řešením (11.26) homogenní diferenciální rovnice dostaneme toto výsledná řešení:

$$q = k_p F_0 \left[ e^{-\frac{t}{RC}} + \frac{1}{1 + \frac{1}{i\omega RC}} e^{i\omega t} \right] \quad (11.28)$$

První člen v závorce se pro  $t \rightarrow \infty$  blíží k nule, takže při časově proměnné síle je možno pracovat pouze a druhým členem v závorce. Jelikož platí vztah  $q = U/C$ , je pak napětí na měřicím přístroji vyjádřeno vztahem:

$$U = \frac{k_p F_0}{C} \frac{1}{1 + \frac{1}{i\omega RC}} e^{i\omega t} \quad (11.29)$$

Tento vztah lze psát ve tvaru:

$$U = U_0 e^{i\omega t}, \text{ kde } U_0 \text{ je amplituda: } U_0 = \frac{k_p F_0}{C} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{i\omega RC}\right)^2}} \quad (11.30)$$

Závislost  $U_0$  na frekvenci kmitání  $\omega$  je znázorněna na Obr. 11.10c. Pro frekvenci kmitání  $\omega \rightarrow \infty$  přejde vztah (11.30) do tvaru  $U_0 = k_p \frac{F}{C}$ , pro který budeme používat označení  $U_\infty$ ,

$$\text{tedy } U_\infty = k_p \frac{F}{C}. \text{ Sílu } F_0 \text{ lze vyjádřit } F_0 = m\ddot{y}_{max}, \text{ takže: } U_\infty = \frac{k_p m\ddot{y}_{max}}{C} \quad (11.31)$$

Z rozboru vztahů (11.29) a (11.30) lze dedukovat:

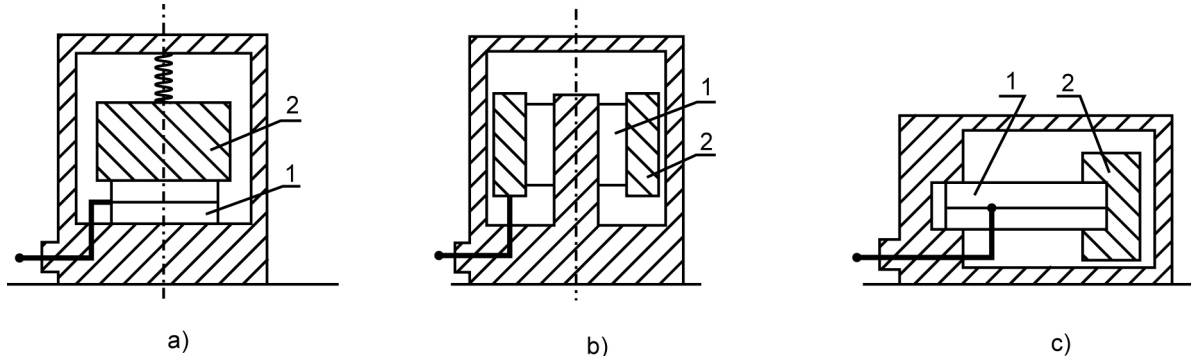
- při stejné amplitudě  $F_0$  zatěžující síly  $F$  je v případě nízké frekvence  $\omega$  amplituda  $U_0$  napětí a tím i vlastní napětí  $U$  velmi malé,
- při hraniční frekvenci  $\omega_m = 1/RC$  je  $U = \frac{k_p R}{\sqrt{2}C}$ , takže napětí  $U$  má přibližně 70% hodnoty napětí  $U_\infty$ ,
- v oblasti  $\omega > \omega_m$  amplituda  $U_0$  v závislosti na  $\omega$  vzrůstá velmi pomalu a asymptoticky se blíží hodnotě  $U_\infty$ . Hraniční frekvence  $\omega_m$  udává spodní hranici frekvenčního rozsahu použitelnosti přístroje,
- změna kapacity  $C$  ovlivňuje změnu hraničního kmitočtu  $\omega_m$ , i změnu citlivosti snímače danou poměrem

$$\frac{U}{F_0} = \frac{k_p}{C}$$

s těmito důsledky:

- a) protože výsledná kapacita  $C$  sestává z kapacity **krystalu** (bývá 1000 pF), **vodiče** (cca 100 pF/m) a **přístroje** (50 pF), může být údaj snímače značně ovlivněn výslednou kapacitou vodiče, která je přímo úměrná délce kabelů mezi akcelometrem a předzesilovačem. Tento nežádoucí vliv lze odstranit tzv. **nábojovým zesilovačem**;
- b) abychom dostali větší napěťový signál je snaha zmenšit výslednou kapacitu  $C$ . Malá kapacita však způsobuje zvětšení hraničního kmitočtu  $\omega_m$  a tím posunutí spodní hranice frekvenčního rozsahu přístroje k vyšším hodnotám  $\omega$ . Aby byl měnič dostatečně citlivý a přitom měnil mechanickou veličinu (sílu, zrychlení) na elektrické napětí bez zkreslení i při malých frekvencích, je nutné při snížení kapacity

$C$  současně zvýšit odpor  $R$ . Toho se dosahuje použitím **speciálních předzesilovačů** s vysokým vstupním odporem, které umožňují měřit spolehlivě zrychlení i při frekvencích kolem 1 Hz.



Obr. 11.11

Provedení piezoelektrických snímačů zrychlení je na Obr. 11.11. Piezoelektrický snímač může být řešen ve tvaru válečku namáhaného tlakem (Obr. 11.11a), mezikruhového válce namáhaného smykem (Obr. 11.11b), nebo ve tvaru prutu namáhaného převážně ohybem (Obr. 11.11c). Elektrický náboj  $q$  (napětí  $U$ ) na krystalu je úměrný setrvačné síle  $F$  hmoty  $m$  při pohybu ve směru  $x$  (viz vztah (11.24)).

Měnič musí být proto orientován tak, aby snímač nebyl citlivý na kmitání ve směrech  $y$  a  $z$ . Pro výrobu piezoelektrických snímačů jsou vhodné tyto materiály: křemen, Seignetova sůl, polykrystalické keramické látky (titanicitan barnatý  $BaTiO_3$ , zirkonicitan olovnatý  $PbZrO_3$ , apod.). Tyto keramické materiály mají přednost v tom, že je lze vyrábět lisováním do libovolných tvarů (na rozdíl od pracné a drahé výroby křemenného výbrusu), jsou stabilní, pevnější než křemen a drží piezoelektrické vlastnosti i do vyšších teplot. Pro ilustraci jsou v tabulce T12 uvedeny vlastnosti některých komerčně vyráběných piezoelektrických akcelerometrů.

**Vlastnosti piezoelektrických snímačů** lze shrnout takto:

- jsou vhodné pro snímání zrychlení mechanického kmitání,
- jsou jednoduché, lehké (i pod jeden gram) s vysokým frekvenčním rozsahem (1 až  $10^5$  Hz),
- dynamický rozsah měření zrychlení je od  $10^{-3}$  až do  $10^6$   $ms^{-2}$ ; lze tedy měřit i zrychlení při rázech,
- pokrývají prakticky všechny potřeby technické praxe z hlediska měření kmitání s výjimkou velmi nízkých frekvencí a statických výchylek,
- mezi nevýhody patří nelinearita výstupního signálu.

### 11.8.3 Indukčnostní snímače kmitání

Patří do širší skupiny induktačních snímačů u nichž měřená veličina mění magnetické vlastnosti magnetického obvodu převodníku, např. hodnotu indukčnosti, tj. hodnotu střídavého elektrického odporu indukční cívky převodu. Induktance indukční cívky je dána vztahem:

$$X_L = \omega L \quad (11.32)$$

kde  $\omega$  je kmitočet střídavého proudu protékajícího cívkou,  
 $L$  je indukčnost cívky.

Ze vztahu (11.32) je zřejmé, že chceme-li pro měření mechanického kmitání použít změnu



$\Delta X_L$ , je nutno pro napájení napájecí cívky použít střídavý elektrický proud s určitou frekvencí  $\omega$ . Při konstantním nosném kmitočtu pak lze psát  $X_L = \omega f(L)$ . Nyní prošetříme, jak realizovat, aby změna  $\Delta L$  byla funkcí určující veličiny kmitání. Protéká-li cívkou střídavý proud, indukuje se v ní elektromotorická síla:

$$e = -L \frac{di}{dt} = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (11.33)$$

kde  $n$  je počet závitů cívky,  
 $\phi$  je magnetický tok  $\phi = in/R_m$ ,  
 $i$  je proud,  
 $R_m$  je magnetický odpor cívky.

S uvážením, že  $\phi = f(i, R_m)$  lze vztah (2.161) psát takto:

$$e = \left| L \frac{di}{dt} \right| = n \left( \frac{\partial \phi}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial R_m} \frac{\partial R_m}{\partial t} \right) \quad (11.34)$$

Za předpokladu, že frekvence změny odporu  $R_m$  tím i jeho časová změna  $\partial R_m / \partial t$  je značně menší (měnič je napájen střídavým proudem s velmi malou frekvencí), než frekvence  $\omega$  kmitajícího tělesa, lze druhý člen v závorce vztahu (11.34) zanedbat. Poněvadž je  $\frac{\partial \phi}{\partial i} = \frac{n}{R_m}$

pak ze vztahu (11.34) dostaneme:

$$e = L \frac{di}{dt} = n \frac{n}{R_m} \frac{di}{dt} \rightarrow L = \frac{n^2}{R_m} \quad (11.35)$$

Indukčnost  $L$  a s ohledem na vztah (11.32) i induktance  $X_L$  jsou tedy funkcí magnetického odporu cívky  $R_m$ .

Magnetický odpor  $R_m$  lze vyjádřit vztahem:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 S} \left( \frac{l_{\text{železa}}}{\mu_{r_{\text{železa}}}} + \frac{l_{\text{vzduchu}}}{\mu_{r_{\text{vzduchu}}}} \right) \quad (11.36)$$

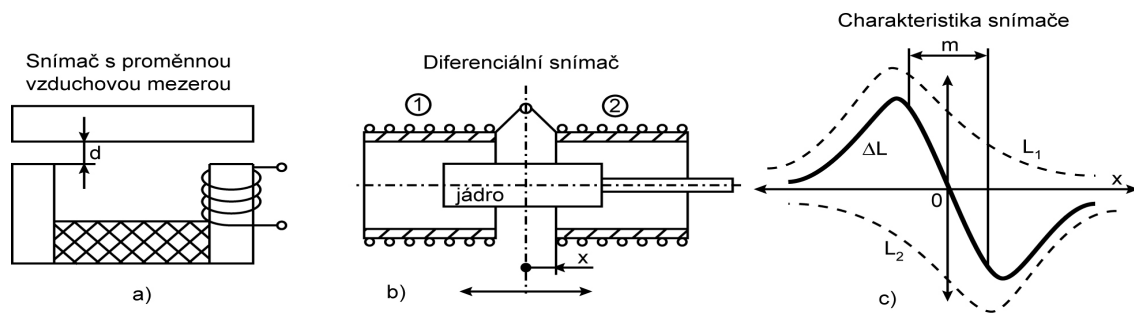
kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  
 $\mu_r$  jsou relativní permeability,  
 $l$  délky magnetických siločar obvodu,  
 $S$  plocha průřezu magnetického toku.

Jelikož  $\mu_{r_{\text{železa}}} \gg \mu_{r_{\text{vzduchu}}}$  lze první člen v závorce vztahu (11.36) zanedbat. Po dosazení za  $R_m$  do (11.35) dostaneme:

$$L = \frac{n^2}{l_{\text{vzduchu}}} \mu_{r_{\text{vzduchu}}} \mu_0 S$$

a dle (11.32) pak:

$$X_L = \frac{n^2}{l_{\text{vzduchu}}} \mu_{r_{\text{vzduchu}}} \mu_0 S \omega \quad (11.37)$$



Obr. 11.12

Změnu indukčnosti  $\Delta X_L$  lze tedy dosáhnout změnou:

- 1) počtu činných závitů cívky (veličiny  $l_{vzduchu}$ ), což je případ tzv. transformátorových převodů,
- 2) relativní permeability  $\mu_{r_{vzduchu}}$
- 3) velikosti vzduchové mezery.

Nejjednodušší je uspořádání indukčnostního snímače s proměnnou vzduchovou mezerou, jehož schéma je na Obr. 11.12a. Změna indukčnosti  $\Delta X_L$  vyjádřena změnou indukčnosti  $\Delta L$  v závislosti na změně  $\Delta d$  vzduchové mezery je dána vztahem:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = K \left( \frac{l}{d + \Delta d} - \frac{l}{d} \right)$$

a relativní změna:

$$\frac{\Delta L}{L_1} = - \frac{l}{l + \frac{\Delta d}{d}} \quad (11.38)$$

Z posledního vztahu vyplývá, že relativní změna indukčnosti bude lineární funkcí změny  $\Delta d/d$  jen tehdy, bude-li platit  $\Delta d \ll d$ . Tento převod lze uspořádat jako diferenciální (Obr. 11.12b). Pohyby železného jádra uvnitř cívek 1,2 mění jejich indukčnost  $\Delta L_1$ , a  $\Delta L_2$  proti sobě, takže rozdílová indukčnost  $\Delta L$  při můstkovém zapojení  $L_1$  a  $L_2$  je v určitém, poměrně velkém, rozsahu  $m$  posuvů jádra lineární funkcí vzdálenosti  $x$ , Obr. 11.12c.

Indukčnostní snímače v uvedeném provedení jsou vhodné pro měření větších posuvů.

Dalším typem indukčnostních snímačů jsou **magnetoelastické převodníky**. Jsou založeny na změně permeability některých látek (permalloyové slitiny) v důsledku jejich mechanické deformace. Dále existují indukčnostní snímače, tzv. **transformátorového typu**.

**Vlastnosti indukčnostních snímačů** mechanického kmitání lze shrnout takto:

- jedná se o pasivní typ snímačů, k jehož funkci je potřebný zdroj střídavého proudu,
- umožňují snímat statické výchylky (některé typy až 50 mm) a kmitání o velmi nízkých frekvencích. Vhodným uspořádáním a zapojením cívek lze v určitém rozmezí výchylek získat lineární pracovní charakteristiku,
- všechny typy mají společné vlastnosti z hlediska chyb, které mohou být způsobeny: kolísáním amplitudy a kmitočtu budícího proudu, změnami teploty (změny geometrie snímačů, změny odporů cívek, ...), rušivými vnějšími střídavými magnetickými poli apod.

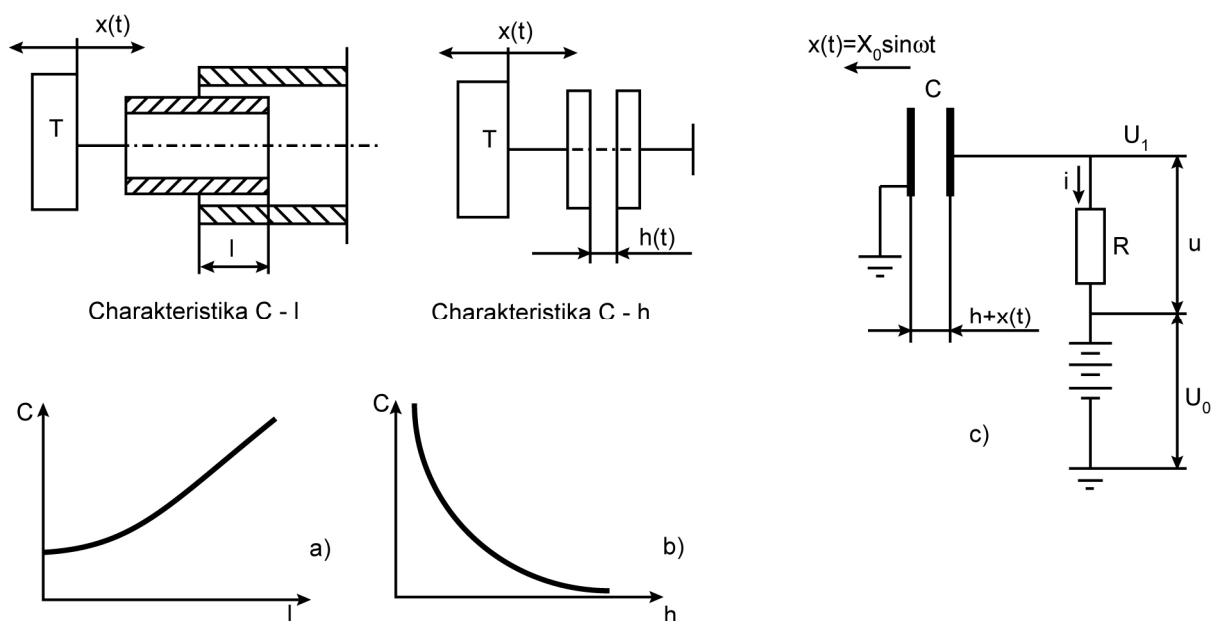
#### 11.8.4 Kapacitní snímače kmitání

Převodník těchto snímačů je tvořen deskami (elektrodami) tvořícími kondenzátor s proměnlivou kapacitou. Změny kapacity lze dosáhnout změnou:

- plochy (překrytí  $l$ ) elektrod kondenzátoru (Obr. 11.13a). Závislost kapacity  $C$

kondenzátoru na délce  $l$  překrytí je v tomto případě lineární,

- vzdálenosti elektrod  $h$  (Obr. 11.13b) - závislost kapacity  $C$  na vzdálenosti elektrod  $h$  je v tomto případě nelineární.



Obr. 11.13

Vlastní kapacitní snímač je napojen na zařízení, které napájí snímač stejnosměrným nebo střídavým napětím. Schéma zapojení při napájení stejnosměrným proudem je na Obr. 11.13c. V klidové poloze se na kondenzátoru a kapacitou  $C_0 = konst / h$  nastaví náboj  $q = U_0 C_0$ . Mění-li se vzdálenost  $h$  elektrod s časem  $t$ , pak se mění i kapacita

$C(t) = \frac{konst.}{h + x(t)}$  a odporem  $R$  protéká proud  $i$ . Pro tyto veličiny platí :

$$q = CU_1, \frac{dq}{dt} = -i, U_1 - U_0 = iR, U_1 = U_0 + u(t) \quad (11.39)$$

Pokud platí  $x(t) \ll h$  a v důsledku toho je  $u(t) \ll U_0$ , lze psát:

$$C = \frac{konst.}{h + x(t)} = \frac{konst.}{h \left[ 1 + \frac{x(t)}{h} \right]} \doteq \frac{konst.}{h} \left[ 1 - \frac{x(t)}{h} \right] = C_0 \left[ 1 - \frac{x(t)}{h} \right] \quad (11.40)$$

Dá se předpokládat, že veškerý přebytečný náboj při změně  $h$  odečte z kondenzátoru odporem  $R$ . Pak pro napětí platí  $U_1 = konst. \doteq U_0$ .

S využitím vztahů (11.39) a (11.40) lze postupně psát:

$$u = Ri = -R \frac{dq}{dt} = -RU_1 \frac{dC}{dt} = -RU_0 \frac{d}{dt} \left\{ C_0 \left[ 1 - \frac{x(t)}{h} \right] \right\} \Rightarrow u = \frac{RU_0 C_0}{h} \frac{dx(t)}{dt} \quad (11.41)$$

Lze tedy konstatovat, že napětí  $u$  na odporu  $R$  je úměrné rychlosti  $dx/dt$  měřeného pohybu.

Zapojení kapacitního snímače podle Obr. 11.13c se používá především při měření velmi rychlých dějů (rázy těles, rychlosti střel, ...). Kapacitní měnič napájený stejnosměrným proudem nemůže zaznamenat pomalé děje.

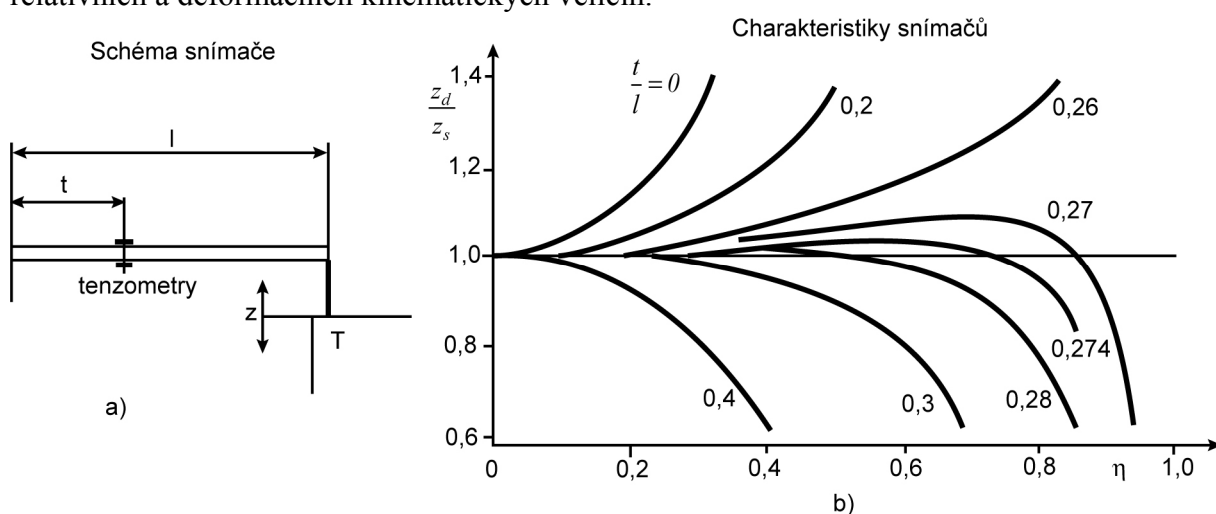
Při časově málo proměnných pohybech je vhodné napájení střídavým napětím o dosti

vysoké frekvenci (1 kHz až 5 MHz), která zajišťuje dobrou citlivost snímače i při malých rozměrech elektrod kondenzátoru. Nosná frekvence napětí musí být asi pětkrát vyšší, než je frekvence měřených kmitů. Podle způsobu zapojení kondenzátoru, změna jeho kapacity způsobená pohybem měřeného tělesa, moduluje amplitudu nebo frekvenci nosného střídavého napětí.

Mezi **výhody** kapacitních snímačů patří, že jsou bezdotykovými snímači, takže jsou vhodné pro snímání kmitání rotujících nebo rychle se pohybujících těles a to s minimální zpětnou vazbou. K **nevýhodám** patří: složitý měřicí řetězec (zejména při střídavém napájení), závislost citlivosti na nastavené vůli  $h$ , u typu dle Obr. 11.9b nelinearita charakteristiky, náchylnost k rušivým vlivům, protože se jedná o vysokohmový prvek a citlivost na vlhkost.

### 11.8.5 Tenzometrické snímače kmitání

Tenzometrické metalické nebo polovodičové snímače lze s úspěchem použít jako snímače relativních a deformačních kinematických veličin.



Obr. 11.14

Schéma relativního snímače nosníkového typu je znázorněno na Obr. 11.14a. Při odvozování vztahu pro dynamickou  $z_d$  a statickou  $z_s$  citlivost snímače se předpokládá, že signál tenzometru je úměrný křivosti střednice prutu v místě  $t$  nalepeného tenzometru. Na Obr. 11.14b je vyneseno poměr těchto citlivostí v závislosti na koeficientu naladění  $\eta$ . Existuje tedy místo nalepení tenzometru  $t/l = 0,274$ , kdy křivost střednice prutu zůstává konstantní až do frekvence  $\omega \doteq 0,8\Omega_0$ . Do této frekvence se poměr  $z_d/z_s$  jen velmi málo odlišuje od jedničky. Pro jiné  $t/l$  jsou křivky monotónně rostoucí nebo klesající. Místo nalepení tenzometru tedy ovlivňuje použitelný měřicí frekvenční rozsah.

Tenzometrické snímače se v oboru mechanického kmitání používají zejména pro určování poměrných deformačních posuvů. Naměřené časové průběhy délkových přetvoření  $\varepsilon$  jsou důležitými údaji pro posuzování mezních stavů součástí při časově proměnných zatíženích. V případě deformačního zatěžování jsou naměřená přetvoření  $\varepsilon$  přímo vstupními údaji do algoritmů pro posuzování životnosti těles, při silovém zatěžování se s využitím konstitutivních vztahů přetvoření přepočítávají na napětí. Výsledkem jsou časové průběhy napětí. Jestliže jako snímače použijeme tenzometrické růžice, lze získat časové průběhy hlavních napětí a jejich směrů.

## 11.9 Kalibrace snímačů kmitání a experimentálního řetězce pro snímání kmitů

Existuje celá řada faktorů, které mohou způsobit změny vlastností snímačů i kmitání, i celého experimentálního řetězce. Patří se např. vliv montáže a demontáže, teplotní změny okolí, vliv elektrických a magnetických polí, mechanické rázy za provozu, změna vlastností prvků měřicího řetězce (výměna spojovacích kabelů, změny vstupních odporů přístrojů apod.). To jsou důvody, proč je nutné snímače kmitání i řetězec kalibrovat, tj. stanovit vazby mezi vstupními a výstupními veličinami.

### 11.9.1 Kalibrace snímačů

Vstupními veličinami u snímačů jsou výchylka, rychlost nebo zrychlení vyšetřovaného tělesa, výstupními veličinami pak napětí nebo proud. Cílem kalibrace je:

- stanovit citlivost snímače v závislosti na frekvenci měřeného pohybu,
- stanovit poměr příčné citlivosti k citlivosti snímače v hlavním směru (má být menší než 3%),
- stanovit rozsah měřitelných vibrací v [ $\mu\text{m}$ ] u snímače výchylek, nebo v [ $\text{ms}^{-2}$ ] u snímačů zrychlení,
- ověřit vliv prostředí na práci snímače (vliv teploty, záření, magnetických a elektrických polí, ...).

Kalibrace se provádí na speciálním vibrátoru, opatřeném kalibračním snímačem pro přesné měření kmitů. Pro určení amplitudy kmitání se dnes používá laserová interferometrie. Sinusovým pohybem lze realizovat zrychlení maximálně  $100 \text{ ms}^{-2}$  a frekvencí maximálně do  $10^4 \text{ Hz}$ . Zrychlení až do  $10\,000 \text{ ms}^{-2}$  je možno dosáhnout vzájemným rázem těles. Kalibrací se získávají kalibrační křivky snímačů kmitání, které umožňují stanovit ze záznamu harmonického pohybu potřebné amplitudové a fázové korekce a s jejich využitím pak získat skutečný průběh měřeného pohybu.

### 11.9.2 Kalibrace experimentálního řetězce

Vedle kalibrace snímačů je nutné provádět i kalibraci dalších prvků řetězce, tj. zesilovačů, integračních členů, registračních zařízení atd., která poskytne informaci o jejich citlivosti. Je-li zapojení přístrojů sériové, pak výsledná citlivost je dána součinem citlivostí jednotlivých prvků. Při tomto přístupu se mohou vyskytovat nepřesnosti způsobené např. zanedbáním vlivů zpětných vazeb mezi přístroji. Výhodnější se proto jeví provádět **kalibraci experimentálního řetězce jako celku**, kdy se sledují výsledné odezvy u rozkmitávané soustavy se známými vlastnostmi, např. těleso se známou hmotností uložené na měkkých pružinách se známými tuhostmi.

Poznámka:

Jak jsme již uvedli, jedním z úkolů kalibrace snímačů je získání kalibračních křivek snímačů kmitání, které umožňují ze záznamu harmonického pohybu stanovit potřebné amplitudové a fázové korekce a tím získat skutečný průběh vyšetřovaného pohybu. Toto je možné u periodických signálů, které lze rozvinout do jednotlivých harmonických složek s následnou analýzou jejich zkreslení a opětným složením. Uvedený postup je velmi obtížný u neperiodických pohybů (přechodové děje, rázy, doznívání vlastních kmitů apod.), a to vzhledem k jejich spojitému frekvenčnímu spektru a pro řešení problému je nutná Fourierova transformace realizovaná na počítači.

## 12 Měřicí metody pro určování veličin vyjadřujících působení na experimentální objekt

Pojem působení na těleso byl zaveden jako soustava interakcí typu účinek, orientovaná od člověka nebo od jiného tělesa k vyšetřovanému tělesu. Byl zde zaveden i pojem funkční působení na těleso, což je složka působení vedoucí k požadované funkci tělesa. Tento typ působení byl pak v pružnosti a pevnosti rozčleněn na zatěžovací a deformační působení. K charakteristickým funkčním působením patří silové působení, zahrnující působení osamělých sil, silových dvojic, plošných a objemových sil a dále působení teplotní.

V pružnosti a pevnosti bylo zavedeno tzv. charakteristické působení - což jsou interakce tělesa s okolím, které nevedou ke vzniku deformace a napjatosti, ale mohou je ovlivňovat. Mezi tato působení řadíme především teplotu, korozivnost, radiaci a vlhkost prostředí.

V této stati se budeme zabývat experimentálním určováním veličin popisujících funkční a charakteristické působení na těleso, konkrétně měřícími metodami a přístrojovým vybavením pro určování sil, silových dvojic, tlaků, teplot a vlhkosti. V závěru statě je pojednáno o vibrátorech, tj. zařízeních určených pro rozkmitávání těles.

### 12.1 Měřicí metody pro určování sil

#### 12.1.1 Snímače sil

Pojem „síla“ je zaveden jako vektorová veličina, která slouží k popisu silového působení na těleso. Pro řešení problémů mechaniky těles, ať již experimentálním nebo výpočtovým modelováním, je nutné síly kvantifikovat. V měřících metodách pro určování sil budeme předpokládat, že známe směr a působiště síly - půjde tedy o určení kvantifikátoru síly, který má číselný charakter.

**Přímé měření síly vážením**, založené na jejím srovnávání s účinky sil tíže, je vhodné pro určování velikosti časově neproměnných sil a v současnosti se prakticky nepoužívá. Dnes se určování velikosti sil téměř výhradně realizuje **nepřímými metodami**, s využitím snímačů sil. Tyto snímače, obdobně jako snímače mechanického kmitání, se skládají z čidla a měniče. Funkce čidla je založena na tom, že silové působení na čidlo způsobuje jeho deformaci. Tato se v měniči (převodníku) mění na signál jiné fyzikální povahy, dnes téměř výhradně na určitý typ elektrického signálu.

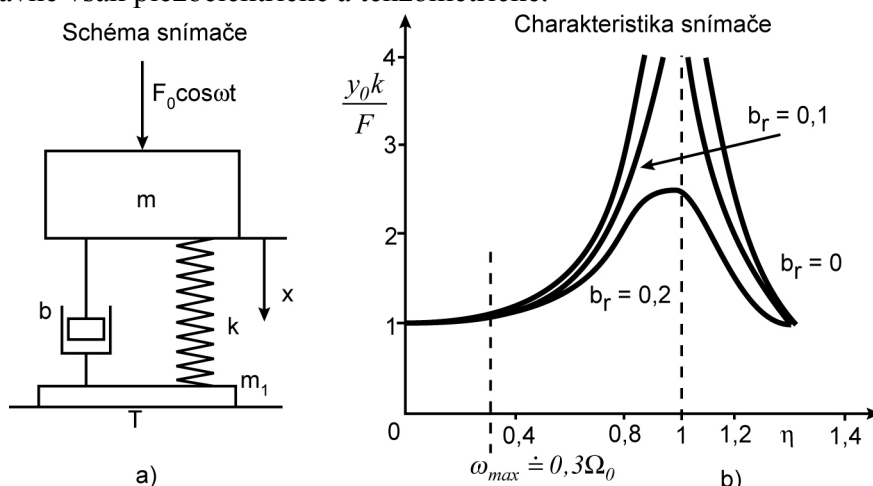
Princip snímačů sil má mnoho společného se snímači mechanického kmitání, jak z hlediska používaných fyzikálních principů převodníků, tak i z hlediska vlastního konstrukčního řešení snímačů.

Snímače sil statického charakteru mají obdobu ve snímačích výchylky mechanického kmitání a snímače pro časově proměnné síly (dynamometry) mají obdobu ve snímačích rychlosti a zrychlení mechanického kmitání. Existuje však rozdíl v tom, že zatímco snímače kmitání umísťujeme vždy z vnějšku na měřenou soustavu, snímače sil jsou zapojeny v řetězci prvků přenášejících silový tok uvnitř soustavy, nebo na vnějšku (např. mezi soustavou a vibrátorem).

Je proto žádoucí, aby snímač síly minimálně ovlivňoval mechanickou soustavu, v níž se určuje síla. V současnosti se téměř výhradně používají snímače sil s mechanicko-elektrickými převodníky (elektrická snímače sil). Z tohoto důvodu budeme věnovat pozornost elektrickým snímačům sil, které lze členit podle různých hledisek. Rozeznáváme aktivní a

pasivní snímače sil podle toho, zda ke své funkci nepotřebují nebo potřebují zdroj elektrické energie. Podle funkce měniče se pak člení (obdobně jako snímače kmitání) na odporové, uhlíkové a tenzometrické, na indukčnostní, magnetoelastické, kapacitní, piezoelektrické, apod. Podle toho, zda snímají časově neproměnné či proměnné síly na statické snímače a dynamické snímače (dynamometry). Neexistuje tedy členění na absolutní a relativní a na dotykové a bezdotykové snímače.

V současné době se jako statické snímače převážně používají snímače u nichž se deformace čidla (tzv. pružného členu) měří tenzometricky, a to tenzometry metalickými nebo polovodičovými. Pro měření časově proměnných sil se používají zejména indukčnostní, kapacitní, hlavně však piezoelektrické a tenzometrické.



Obr. 12.1

### 12.1.1.1 Teorie snímačů časově proměnných sil

Modelem snímače časově proměnných sil  $F(t) = F_0 \sin \omega t$  může být soustava dle Obr. 12.1a s jedním stupněm volnosti. Hmotota  $m$  zahrnuje hmotnost vlastní seizmické hmoty snímače a hmotnost připojených pohyblivých částí soustavy v níž se určuje síla. Jestliže zanedbáme posuv tělesa T (snímač je s ním ve styku svou spodní částí) od působení síly, pak pro výchylku  $x$  hmoty  $m$  snímače lze sestavit tuto diferenciální rovnici:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_0 \sin \omega t$$

s řešením  $y = y_0 \sin(\omega t - \varphi)$  (12.1)

v níž je: 
$$y_0 = \frac{F}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2b_r \eta)^2}}$$
 (12.2)

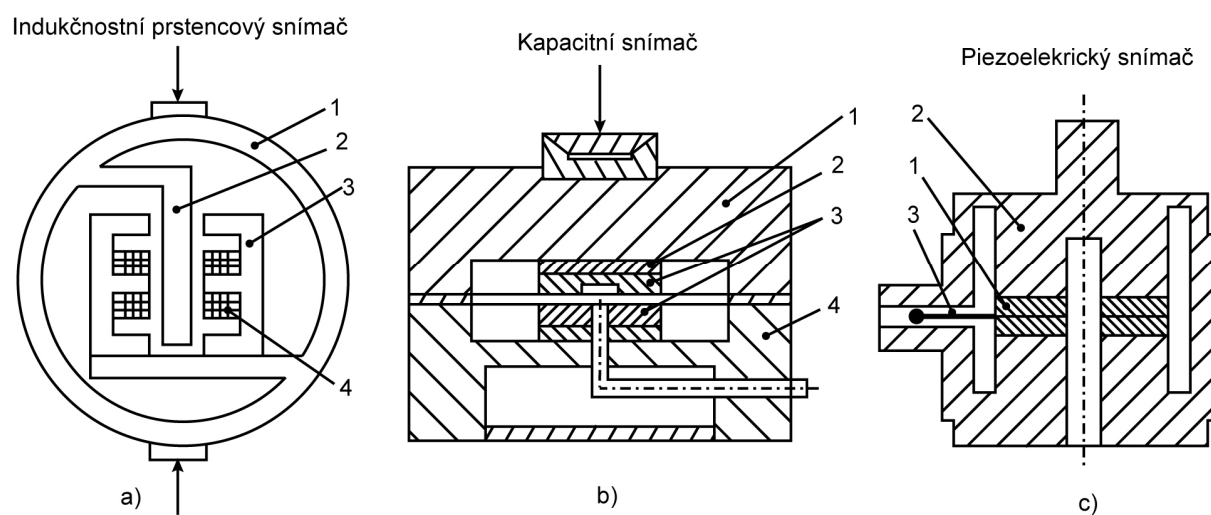
$$\varphi = \arctg \frac{2b_r \eta}{1 - \eta^2}$$

kde  $\eta$  je koeficient naladění  
 $b_r$  je poměrný (relativní) útlum

Závislost citlivosti snímače  $\frac{y_0 k}{F_0}$  na naladění  $\eta$  při poměrných útlumech  $b_r \in (0 \div 0,2)$ , které jsou charakteristické pro málo tlumené snímače časově proměnných sil,

je uvedena na Obr. 12.1b. Z této závislosti je zřejmé, že snímače, jejichž model je na Obr. 12.1a, lze používat pro měření časově proměnných sil bez jejich podstatného zkreslení v případech, že nejvyšší harmonické složky sil mají frekvenci menší, než je cca třetina vlastní frekvence snímače, tedy  $\omega_{imax} = \Omega_0 / 3$ . Lze konstatovat, že vlastnosti siloměrů jsou podobné vlastnostem málo tlumených snímačů zrychlení. Rozdíl je v tom, že u akcelerometrů se velikost seizmické hmoty nemění, zatímco u siloměrů je závislá na velikosti hmoty připojené soustavy ke snímači.

Ze vztahu (12.2) je zřejmé, že s rostoucí tuhostí  $k$  čidla se deformace  $y$  a tedy i citlivost mechanické části snímače zmenšuje. Abychom dosáhli vysoké citlivosti, měly by mít snímače síly malé tuhosti  $k$ . To by však vedlo k tomu, že by se snižoval pracovní frekvenční rozsah snímače, protože platí  $\omega_{max} = \Omega_0 / 3 = \sqrt{k/m} / 3$ . Požadavky vysoké citlivosti a velkého frekvenčního rozsahu snímače z hlediska volby tuhosti  $k$  jsou tedy protichůdné. Při návrhu snímačů sil se postupuje tak, že se volí velká tuhost členu snímače sil a potřebná citlivost se dosahuje použitím vhodných měničů mechanické deformace na elektrický signál, (především piezoelektrické a tenzometrické).



Obr. 12.2

## 12.2 Princip a provedení nepoužívanějších snímačů sil

### 12.2.1.1 Indukčnostní snímače síly

Používají se pro měření sil od  $10^{-2}$  do 10 MN; jsou vhodné především pro měření malých sil. Přesnost snímačů je menší 1 až 3%. Pro měření malých sil se obvykle používají snímače s jádrem uchyceným na tenkých membránách, eventuálně jsou tyto membrány přímo součástí magnetického obvodu snímače (obdobu snímače kmitání). Pro rozsahy 10 N až 1 MN se používají snímače ve spojení s prstencovým pružným členem.

Pro ilustraci je na Obr. 12.2a znázorněn prstencový snímač síly s diferenčním snímačem s malou vzduchovou mezerou. Působením síly se deformuje prsteneček 1 a s ním spojená kotva 2 se posune mezi jádra 3, čímž se změní indukčnost cívek 4 zapojených do můstku.

### 12.2.1.2 Kapacitní snímače síly

Deformační člen má většinou tvar desky, která zároveň tvoří jednu elektrodu kondenzátoru. Působením síly se mění vzdálenost mezi elektrodami a tím i kapacita



kondenzátoru. Používají se především pro měření časově proměnných sil. Jejich nevýhodou je poměrně malá změna kapacity a tedy i malý výstupní signál. Na Obr. 12.2b je příklad konstrukčního řešení kapacitního snímače. K tělesu 4 je přišroubována měřící deska 1. Uvnitř snímače jsou mezi izolačními vložkami 2 umístěny elektrody 3 kondenzátoru. Působením síly se deska 1 deformuje a dochází ke zmenšení vzdálenosti  $v$  mezi elektrodami kondenzátoru a tím ke změně kapacity, která se registruje.

### 12.2.1.3 Piezoelektrické snímače sil

Měřítkem velikosti měřená síly je velikost napětí vzniklého na elektrodách destičky vyříznutá pod vhodným směrem z krystalu s piezoelektrickými vlastnostmi. Jsou to snímače aktivní a používají se zejména pro měření časově proměnných sil. Výstupní signál je poměrně velký, při impedančním přizpůsobení až desítky voltů. Ukázka piezoelektrického snímače je na Obr. 12.2c. Obsahuje dva piezoelektrické krystaly 1 orientované tak, aby se při stlačování částmi 2 jejich náboje sčítaly. Výstupní signál je vyváděn vodičem 3. Snímače se vyrábějí v nejrůznějších konstrukčních obměnách pro tahové a tlakové síly. Měřicí rozsah od 1 N do 10 kN. Vyrábějí se též snímače pro současně měření sil ve třech osách.

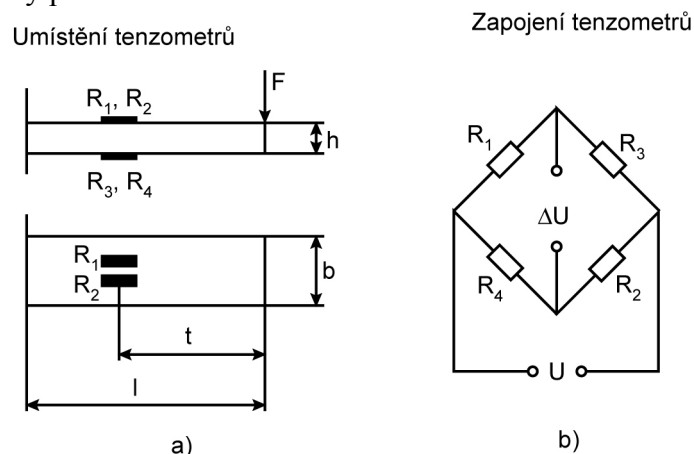
### 12.2.1.4 Magnetoelastické snímače sil

Měřítkem velikosti síly je změna magnetické vodivosti feromagnetika vzniklá působením síly. Dělí se snímače magnetoizotropní, intenzitní a snímače využívající inverze Wiedemannova jevu. Jsou popsány v odborné literatuře.

### 12.2.1.5 Tenzometrické odporové snímače sil

Měřítkem velikosti síly je velikost deformace pružného členu způsobená měřenou silou. Deformace se měří odporovými tenzometry (metalickými nebo polovodičovými). Odporové tenzometry vhodně nalepené na měřicím prvku jsou zapojeny tak, že vytvářejí úplný měřicí můstek. Změny odporů jednotlivých odporů, jako důsledek deformace měřicího prvku, se pak v můstku sčítají. Pro zvýšení citlivosti je možné zapojovat do jedné větve více tenzometrů. U některých typů snímačů je nejmenší relativní chyba měření odporu a tím i poměrného přetvoření 0,04%.

Na případu jednoduchého tenzometrického snímače síly, dle Obr. 12.3a ilustrujeme nejzákladnější výpočty při návrhu snímače.



Obr. 12.3

V místě umístění tenzometrů, určeném souřadnicí  $t$  je napětí:

$$\sigma = \frac{Ft}{W_0} = \frac{6Ft}{bh^2}$$

a poměrné přetvoření: 
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \rightarrow \varepsilon = \frac{6Ft}{Ebh^2} \quad (12.3)$$

Jestliže vyžadujeme, aby s  $k_k$  násobnou bezpečností byla závislost „ $\varepsilon$ - $F$ “ lineární, pak musí být splněna podmínka vyjadřující  $k_k$  násobnou bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti, tedy:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_k}{k_k} \rightarrow \frac{6F_{max}l}{bh^2} = \frac{\sigma_k}{k_k}$$

Z této podmínky lze určit maximální zatěžující sílu měřicího prvku  $F_{max}$  a ze vstupu (12.3) tomu odpovídající  $\varepsilon_{max}$ :

$$F_{max} = \frac{bh^2}{6l} \frac{\sigma_k}{k_k}; \quad \varepsilon_{max} = \frac{l}{E} \frac{t}{l} \frac{\sigma_k}{k_k} \quad (12.4)$$

Přesnost měření síly pomocí snímačů sil závisí na kvalitě tenzometrů (určená relativní chybou  $k$  - faktoru), na přesnosti realizace měřicího prvku, na způsobu a přesnosti realizace zatížení, na přesnosti cejchování. Bezpečnost  $k_k$  vzhledem k mezi kluzu  $\sigma_k$  se volí v rozmezí 1,3 až 1,5. Vzhledem k rozptýlům v hodnotách  $k$  - faktorů tenzometrů, rozptýlům modulu pružnosti, přesnosti umístění a nalepení snímačů, je nutné každý snímač síly cejchovat. Měřicí prvky musí být navrženy tak, aby:

- pro zadaný rozsah hodnot měřené veličiny byla závislost „deformace prvku - zatížení snímače“ lineární.
- prvek byl dostatečně tuhý a nedocházelo u něho k mezním stavům deformační stability,
- zatížení prvku bylo jednoznačné a reprodukovatelné.

Při návrhu snímače je nutné rozlišovat, zda bude sloužit k měření časově proměnných nebo neproměnných sil. Pro měření periodicky proměnných sil jsou vhodnější snímače jejichž měřicí prvky jsou namáhány na tah nebo tlak, protože vlastní frekvence těchto prvků jsou značně větší, než u prvků ohýbaných (frekvence  $\omega$  je přímo úměrná odmocnině tuhosti prvku). Tak např. frekvence jednostranně vetknutého prutu namáhaného tahem je:

$$\omega_t = \sqrt{\frac{F}{u}} = \sqrt{\frac{Ebh}{l}},$$

namáhaného ohybem je:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{F}{w}} = \sqrt{\frac{Ebh^3}{4l}},$$

a jejich poměr je:

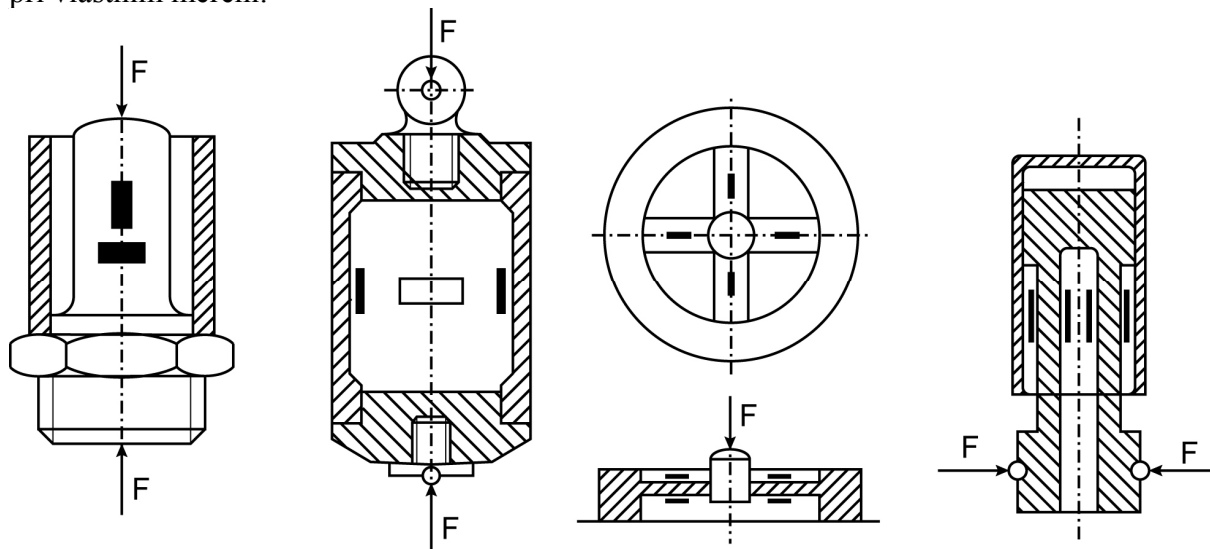
$$\frac{\omega_t}{\omega_o} = \frac{2l}{h},$$

kde  $u$  je posuv  
 $w$  je průhyb prutu.

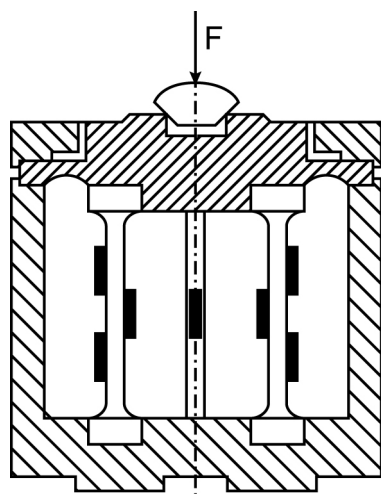
Provedení různých snímačů sil jsou na Obr. 12.4. Snímače dle Obr. 12.4. jsou vhodné pro měření značně velkých sil (do desítek MN). Pro menší síly (řádově kN) tahové i tlakové jsou vhodné snímače dle Obr. 12.4b. Snímač dle Obr. 12.4c je vhodný pro měření velmi malých sil (setiny N až desítky N). Snímač dle Obr. 12.4d je vhodný pro měření v prostorově omezených případech. Ukázky funkčního schématu a komerčního provedení u dvou základních typů snímačů sil jsou uvedeny na Obr. 12.5 a Obr. 12.6.

Na uvedených snímačích jsou ukázány pouze některá jednodušší tvary pružných prvků snímačů sil. Všeobecně by měl snímač vykazovat linearitu závislosti „zatížení-poměrná

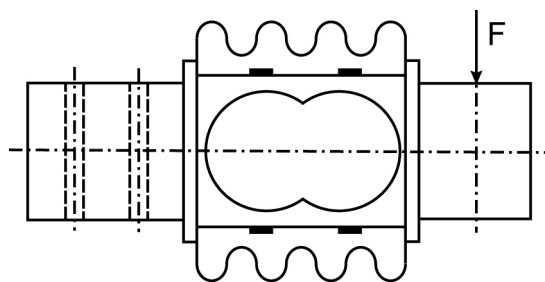
dálková přetvoření“, což není jednoduché splnit. Požadavek linearity u pružných členů je možno docílit často jen za cenu komplikovaných tvarů (obvykle patentově chráněných). Značné nároky jsou kladeny i na použité tenzometry a jejich instalaci (vysoká linearita, nízká hystereze, odolnost proti únavovému poškození). Elektrické obvody snímače musí umožnit jeho počáteční nastavení na jmenovitý odpor a jmenovitou citlivost a zabránit jejím změnám při vlastním měření.



Obr. 12.4



Obr. 12.5



Obr. 12.6

### 12.3 Měřicí metody pro určování momentů síly

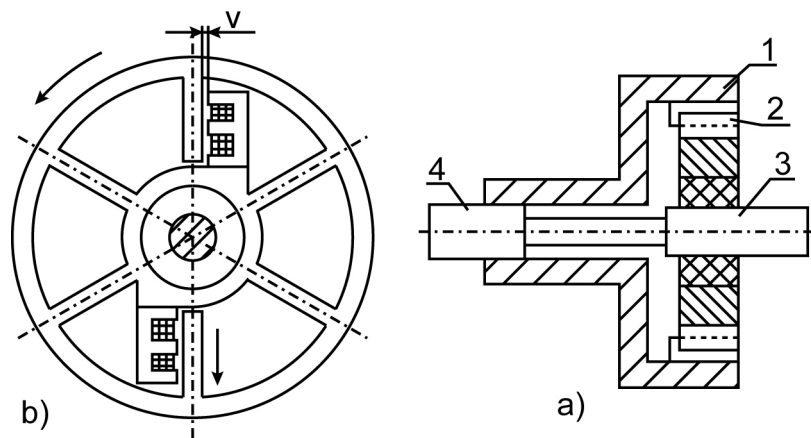
Experimentální určování momentu síly je charakteristickým strojírenským měřením, zejména v souvislosti s přenosem mechanické energie a určováním výkonu strojů. Obdobně jako určování sil i určování momentu síly se dnes realizuje prakticky pouze nepřímými metodami, zejména elektrickými snímači momentu síly, které mají vysokou přesnost měření a umožňují přenos měřeného signálu na dálku. Z hlediska způsobu přenosu signálu je důležité rozlišovat, zda se moment síly měří na stacionárních nebo na rotujících tělesech. Při měření na rotujících tělesech je možné odebírat signál buď pomocí přenosových zařízení, kdy je vyveden na statorovou část nebo je telemetricky vysílán přímo z rotující části.

Součástí všech elektrických snímačů momentu síly je čidlo, které se deformuje v důsledku působení momentu síly. Deformace čidla se mění na elektrický signál podle charakteru měniče; odporovými tenzometry se měří poměrné přetvoření na povrchu hřídele; rozdíl úhlu natočení na určité délce hřídele způsobuje změnu indukčnosti nebo kapacity, apod.

#### 12.3.1 Principy a provedení nejpoužívanějších snímačů momentu sil

##### 12.3.1.1 Kapacitní a indukčnostní snímače

Měřítkem velikosti momentu síly je změna kapacity v důsledku změny vzdálenosti dvou elektrod. Na Obr. 12.7b je snímač momentu síly tvořen dvěma elektrodami 1 a 2 zubového tvaru, které jsou uchyceny na hřídeli a elektroda 2 je izolována. Vzduchová mezera mezi elektrodami se změní v důsledku různých úhlů natočení části 3 a části 4 hřídele. Výstupní signál musí být s rotujícího hřídele vyveden na jeho statorovou část. Na Obr. 12.7b je schéma indukčnostního snímače.



Obr. 12.7

##### 12.3.1.2 Fázové snímače momentu síly s generátorem impulsů

Blokové schéma tohoto snímače je na Obr. 12.8. V určité vzdálenosti  $l$  jsou na hřídeli umístěny dva generátory impulsů  $G_1$ ,  $G_2$ , pracující na indukčním, kapacitním nebo fotoelektrickým principem. Při rotaci nezatíženého hřídele jsou impulsy z míst značek  $z_1$ ,  $z_2$  vysílány současně. Je-li hřídel zatížen tak, že podél úseku délky  $l$  je kroučící moment  $M_k$  konstantní, zkroutí se na této délce o úhel

$$\varphi = \frac{M_k l}{GJ_p}$$

a značky  $z_1, z_2$  se o tento úhel vzájemně natočí. Impulzy z míst  $z_1, z_2$  jsou časově posunuty o určitý časový rozdíl  $\Delta t$ . Je-li doba jedné otáčky hřídele rovna  $T$  platí;

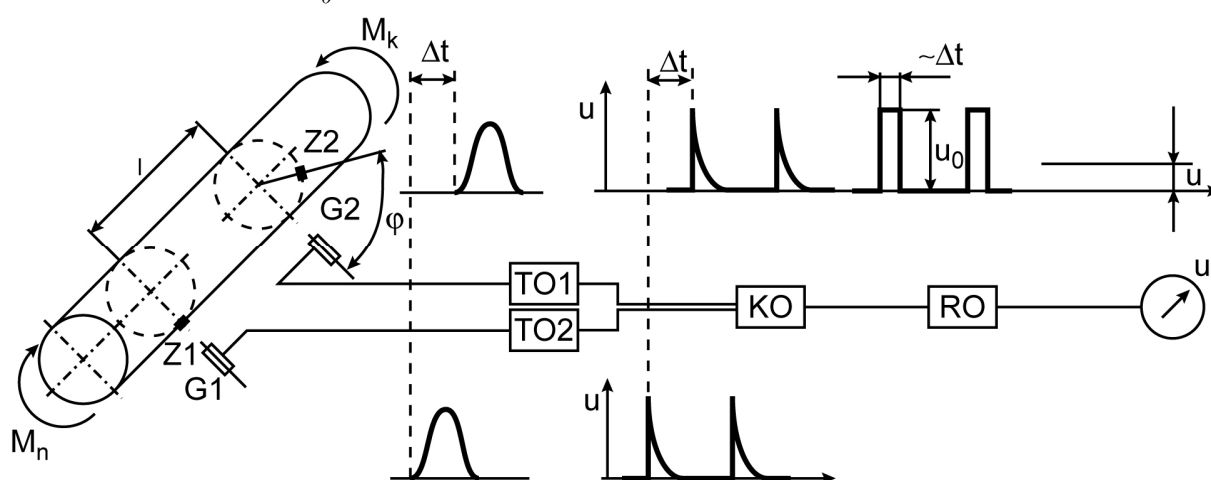
$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi}, \varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T}$$

a tedy: 
$$M_k = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \frac{GJ_p}{l}$$

Impulzy z generátorů  $G_1, G_2$  jsou vedeny do tvarovacích obvodů  $TO1, TO2$ , kde získají tvar dle Obr. 12.8 a jsou dále vedeny do klopného obvodu  $KO$  z něhož vystupují ve tvaru impulsů se šířkou úměrnou  $\Delta t$ .

V obvodu  $RO$  jsou impulsy převedeny na střední hodnotu  $\bar{u}$ , pro niž platí:

$$\bar{u} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} u dt = U_0 \frac{\Delta t}{T} \rightarrow \frac{\Delta t}{T} = \frac{\bar{u}}{U_0}$$



Legenda:

$G_1, G_2$  ... generátor pulsů  
 $TO1, TO2$  ... tvarovací obvody

$KO$  ... klopný obvod  
 $Z1, Z2$  ... značky na hřídeli

$RO$  ... rozdílový obvod

Obr. 12.8

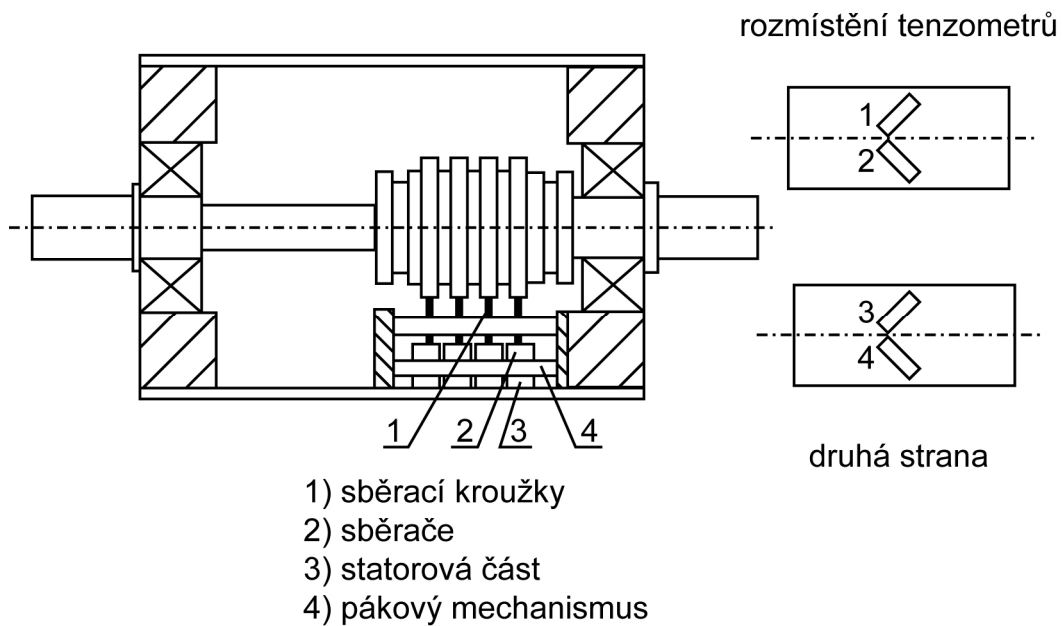
Dosadíme-li vztah pro  $\Delta t/T$  do vztahů pro  $M_k$  dostaneme:

$$M_k = 2\pi \frac{\bar{u}}{U_0} \frac{GJ_p}{l} \rightarrow M_k = \frac{\pi}{16} \frac{Gd^4}{l} \frac{\bar{u}}{U_0}$$

Zcela obdobně pracuje i fázový snímač momentu síly s generátorem harmonického signálu. Na velikost  $M_k$  lze usuzovat z fázového posuvu harmonických signálů vysílaných z míst značek  $z_1, z_2$ .

### 12.3.1.3 Odporové tenzometrické snímače.

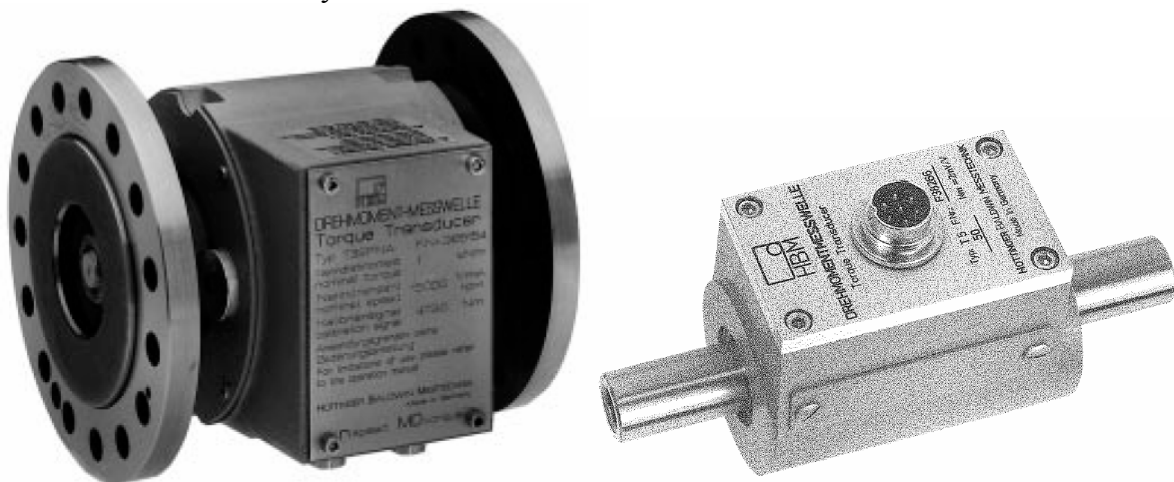
Měřítkem velikosti momentu síly je velikost smykových napětí, které se určují z údajů vhodně orientovaných tenzometrických snímačů na povrchu hřídele. Princip tohoto snímače momentu síly je na Obr. 12.9.



Obr. 12.9

Tenzometry jsou orientovány pod úhlem  $45^\circ$  vzhledem k ose hřídele. V těchto směrech (při smykové napjatosti vyvozené kroutícím momentem) působí extrémní smyková napětí. Tenzometry jsou zapojeny tak, že tvoří úplný můstek a současně je kompenzován parazitní vliv teploty. Napájecí a měřící body můstku jsou vyvedeny přes sběrací kroužky 1 a sběrače 2 na statorovou část 3. Pákovým mechanismem 4 je možno sběrač ze sběracích kroužků zvednout, aby v době, kdy se neměří, nedocházelo k jejich opotřebení. Běžné je i telemetrické vysílání signálu z hřídele.

Snímače momentu síly s odporovými tenzometry se vyrábějí komerčně pro rozsahy momentů od 10 Nm do 100 kNm pro rozsah otáček  $7000$  až  $15000 \text{ min}^{-1}$ . Teplotní rozsahy jsou  $0$  až  $120^\circ\text{C}$ . Přesnost v rozsahu  $0,2$  až  $2\%$  v závislosti na koncepci snímače. Při dynamických měřeních se můstek napájí stejnosměrným napětím nebo střídavým napětím s vyšším kmitočtem. Na Obr.12.10 jsou ukázky dvou různých komerčních provedení snímačů kroutících momentů firmy HBM.



Obr. 12.10

## 12.4 Měřicí metody pro určování tlaku

### 12.4.1 Úvod

Jednou z fyzikálních veličin, které způsobují zatížení těles, je **měrný tlak**, (tlak), vymezený jako měrné povrchové zatížení  $\vec{P}$  v bodě povrchu tělesa, působící ve směru normály k tomuto povrchu a orientováno dovnitř tělesa. Měrný tlak vzniká jako důsledek vzájemného silového působení tělesa s jeho okolím. Tímto okolím může být reálné těleso nebo prostředí (kapalina, plyn, sypká látka, zemina,...). Možnosti a způsoby určování měrného tlaku působícího na vyšetřované těleso jsou závislé na řadě činitelů, zejména:

- **charakteru styku** – zda se vyšetřované těleso stýká s jiným reálným tělesem nebo prostředím,
- na **časovém charakteru styku** působícího tělesa nebo prostředí.

Řešení problematiky stykového tlaku v případě dvou stýkajících se reálných těles je součástí tzv. **kontaktních úloh**. Pro některé typy elementárních typů těles byla nalezena analytická řešení kontaktních problémů (styk dvou koulí, styk koule s rovinou apod.). Pro styk složitějších typů těles je dnes k dispozici metoda konečných prvků. Složitost algoritmu a možnost jeho realizace na počítače souvisí s **typem kontaktní úlohy**, zda je rovinná, rotačně souměrná nebo obecná prostorová. Výpočtové modely pro řešení MKP vycházejí vždy z určitých předpokladů o charakteru tření na stykových plochách. Věrohodnost řešení pak závisí i na tom, zda matematický model, popisující tření na stykové ploše, je v dobrém souladu s realitou.

**Experimentální určování** stykového tlaku ve stykové ploše dvou reálných těles přináší sebou tento zásadní problém. Jakékoliv měřicí čidlo, které je nutné dát do stykové plochy nebo její těsné blízkosti, ovlivňuje charakter styku a tím i rozložení stykového tlaku. Jsou známé přístupy, kdy se do dotykové plochy vkládá tenká fólie, buď kovová (hliník, měď) nebo papírová (kopírovací papír) a na rozložení tlaku se usuzuje ze stupně otláčení kovové fólie, nebo ze stupně sytosti zanechaného barevného otláčení na stykové ploše při použití papírové fólie. Získané výsledky mají pouze orientační charakter. Věrohodnější je získaný poznatek o velikosti stykové plochy, než o rozložení stykového tlaku.

V uplynulých letech byly na katedře mechaniky těles rozvíjeny pro určování stykových tlaků **přístupy silové identifikace**, spočívající v tom, že v okolí stykové plochy se na jednom ze stýkajících se těles experimentálně určí posuvy, resp. délková přetvoření, která tvoří vstupy do algoritmu nepřímé (inverzní) úlohy, jejímž řešením je rozložení stykového tlaku. Tento přístup je velmi náročný a provádí se jen v důležitých, zdůvodněných případech.

Jestliže je vyšetřované těleso zatíženo silami vzájemného působení od kapalného nebo plynného prostředí, pak velikost těchto sil lze určit ze známé plochy, na kterou působí toto prostředí a ze známého rozložení celkového tlaku tekutiny na této ploše. V proudící tekutině je výsledný celkový tlak  $p_c$  dán součtem statického tlaku  $p_s$  a dynamického tlaku  $p_d = \rho w^2 / 2$ , kde  $\rho$  je hustota a  $w$  rychlost proudění tekutiny.

Pro další úvahy se předpokládá, že studujícím jsou známy základní pojmy jako: absolutní, barometrický a hydrostatický tlak, přetlak, podtlak, vakuum, difference tlaků a definice, hodnoty a názvy jednotek tlaku. V dalším textu je pozornost věnována metodám a přístrojům pro měření tlaku tekutin (kapalin a plynu).

## 12.4.2 Měřicí metody a měřicí přístroje

Z hlediska toho, zda velikost tlaku tekutiny měříme přímo nebo zprostředkovaně, existují:

- **metody přímé** – kdy velikost tlaku se určuje přímo z jeho definice. K těmto metodám patří např. měření tlaku tzv. U-trubicemi, u nichž rozdíl výšek kapaliny je přímo úměrný velikosti tlaku,
- **metody nepřímé** – tlak se určuje ze změny veličiny, která nesouvisí s definicí tlaku – v důsledku působení tlaku se deformuje určitý pružný člen a jeho deformace je přímo úměrná změně tlaku. Patří sem např. membránové tlakoměry apod.

Přístroje k určování tlaku jsou označovány jako **tlakoměry**. Podle hodnot měřených tlaků se vžila tato označení – **manometr** (měření přetlaku), **vakuometr** (měření vakua), **manovakuometr** (přetlak i vakuum), **diferenční tlakoměr** (měření rozdílu tlaku). Žádný typ tlakoměru nemůže pracovat v celém rozsahu prakticky měřených hodnot tlaku od  $10^{-11}$  do  $10^{10}$  Pa. Pro různé rozsahy tlaků se proto využívají různé fyzikální principy, různé typy převodníků (tlakoměry pak podle toho členíme např. na kapalinové, deformační, plynové, elektrické apod.) a různá konstrukční provedení. Přehled jednotlivých typů tlakoměrů s orientačním rozsahem měřitelných tlaků je uveden v Tab. 12.1. (rozsahy tlaků jsou uvedeny v Pa)

Typy tlakoměrů	vakua		podtlaky		přetlaky		informativní velikosti mezní chyby
	extrémní	technická	malé	velké	malé	velké	
	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$10^0$	$10^3$	$10^6$	
ionizační vakuometry	██████████						cca 10%
bolometrické vakuometry		██████████					1 - 2%
kompresní vakuometry		██████████					cca 5%
kapalinové tlakoměry				██████████			0,1 - 1%
membránové deformační manometry				██████████			1,5 - 4%
trubicové deformační tlakoměry				██████████			0,6 - 4%
vlnocové tlakoměry				██████████			1,5 - 4%
pístové tlakoměry					██████████		0,02 - 0,1%
odporové tlakoměry						██████████	cca 3%
prstencové tlakoměry						██████████	1-1,5%
typ Askania				██████████			cca 0,02mm
piezoelektrické				██████████			
polovodičové				██████████			

Tab. 12.1

### 1. Kapalinové tlakoměry

#### Trubicové manometry

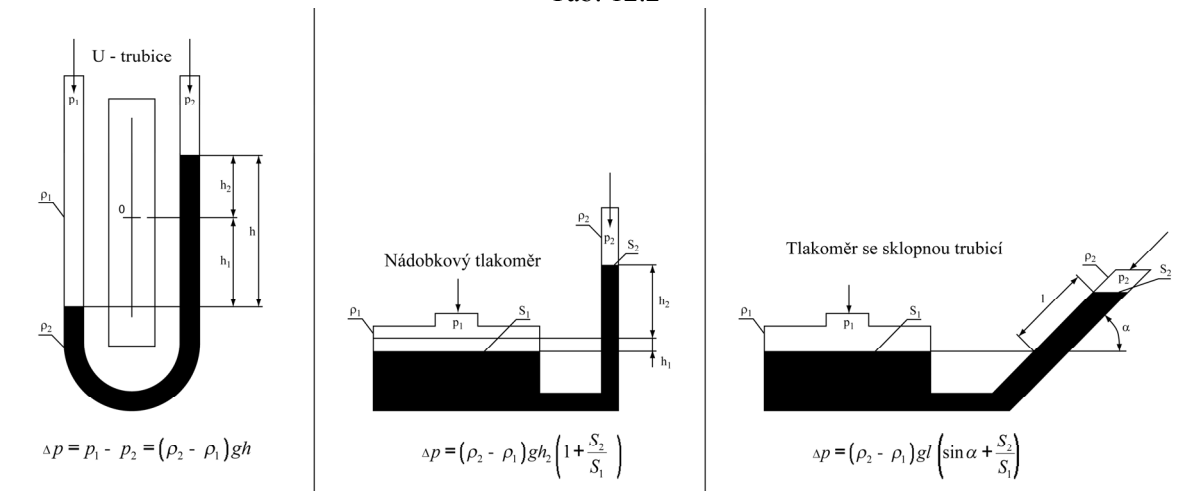
Měřítkem změny tlaku (tlakového rozdílu) je změna výšky tlakoměrné kapaliny (Tab. 12.2) obvykle v přímé trubicí. Vztahy pro změnu tlaku jsou pro základní typy kapalinových manometrů uvedeny v obr. 12.1. Jejich odvození z rovnice rovnováhy uvolněného kapalinového sloupce musí být pro posluchače samozřejmé. Délka U-trubic bývá 1,5 m, čemuž odpovídá i měřicí rozsah: 15 kPa pro vodu, 25 kPa pro tetrachlor, 200 kPa pro rtuť.



Při měření tlakového rozdílu je měřící rozsah 0 až 10 MPa – náplň je rtuť, trubice jsou z nerezové oceli.

Kapalina	$\rho$ 20°C [kgm <sup>-3</sup> ]
Destilovaná voda	998,2
Ethylalkohol C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	791,0
Toluol	864,0
Tetrachlór CCl <sub>4</sub>	1594,7
Acetylentetrabromid	2980,0
Rtuť	13545,7

Tab. 12.2



obr. 12.1

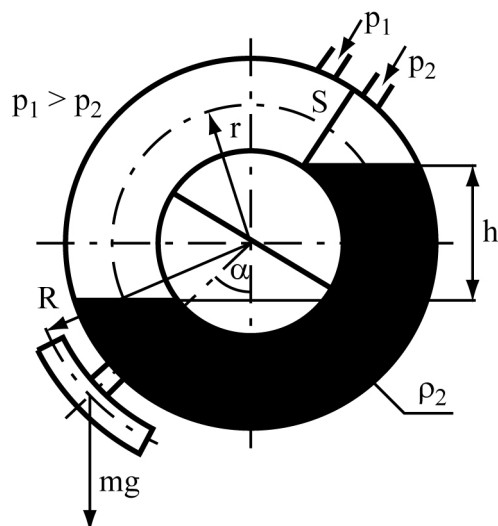
### Prstencové tlakoměry

Měřítkem změny tlaku je opět změna výšky kapaliny, měřícím ústrojím je trubice stočená do tvaru prstence (obr. 12.2). Prostor prstence je rozdělen přepážkou a naplněn asi do poloviny kapalinou. Po obou stranách přepážky jsou přívody tlaku  $p_1, p_2$ . Prstenec je uložen na břitech umožňujících jeho výkyvy. Je opatřen závažím, které určuje měřící rozsah. Úhel natočení při zavedení tlaku se měří na stupnici dělené v jednotkách tlaku. Z rovnováhy soustavy plyne pro tlakový rozdíl vztah:

$$\Delta p = \frac{mgR}{Sr} \sin \alpha$$

Tlakový rozdíl nezávisí na hustotě plnicí kapaliny. Hodnota hustoty vymezuje pouze maximální měřící rozsah. Prstencové tlakoměry se vyrábějí jako vysokotlaké s náplní rtuti (měřitelný tlakový rozdíl 25 MPa, přesnost  $\pm 2\%$ ) a nízkotlaké s vodní, olejovou nebo toluenovou náplní (rozdíl 2 MPa, přesnost  $\pm 1\%$ ).

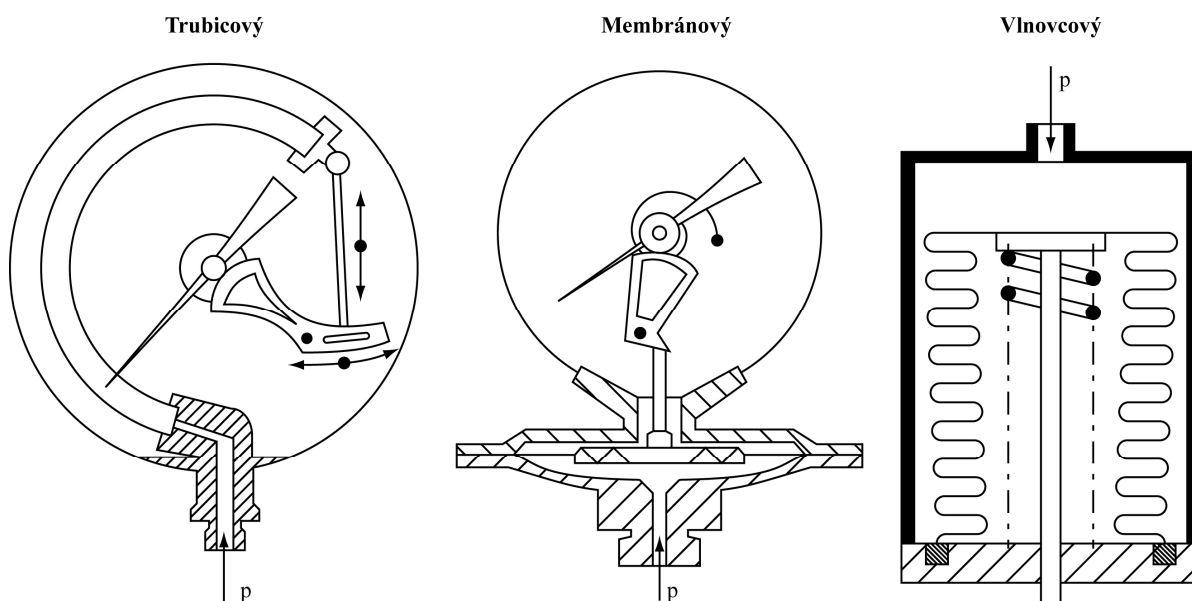
Poznámka: do skupiny kapalinových tlakoměrů patří ještě pístové a zvonové tlakoměry.



obr. 12.2

## 2. Deformační tlakoměry

U těchto tlakoměrů je měřítkem změny tlaku deformace pružného tlakoměrného prvku. Podle druhu tohoto prvku rozeznáváme tlakoměry trubicové, membránové, vlnovcové a krabicové, obr. 12.3.



obr. 12.3

Tlakoměrným prvkem u **trubicových tlakoměrů** (bourdonských) je trubice oválného příčného průřezu, stočená do kruhového oblouku nebo do spirály. Při zavedení měřeného tlaku do trubice vykazuje volný konec posuv, který se převodem přenáší na ukazatel. Tyto tlakoměry se vyrábějí pro měřicí rozsah 40 kPa až 200 MPa, v třídě přesnosti 1,6 - 2,5 - 4 jako provozní a v třídě 0,6 a 1 jako kontrolní.

Tlakoměrným prvkem **membránových tlakoměrů** je kruhová membrána uložená do komory, do níž se z jedné strany přivádí tlakové médium. Průhyb membrány se přenáší převodovým ústrojím na ukazatel. Vyrábí se v rozsazích do 4 MPa v třídách přesnosti 1,6 - 2,5 - 4. Vyrábí se i speciální membránové tlakoměry pro měření tlakových rozdílů.

**Vlnovcové tlakoměry** mají jako tlakoměrný prvek kovový měch – vlnovec. Měřicí rozsah se ovlivňuje tuhostí vložené pružiny. Používají se pro měření přetlaků a tlakových rozdílů do 0,4 MPa, při statickém tlaku 2,5 MPa.

### 3. Elektrické tlakoměry

Měřítkem změny tlaku je změna některé elektrické veličiny v závislosti na tlaku. Používají se pro měření extrémních a technických vakuí (vakuometry) a pro měření velkých přetlaku (manometry). Z četných, v praxi používaných elektrických tlakoměrů, zde uvádíme pouze některé typické principy přístrojů.

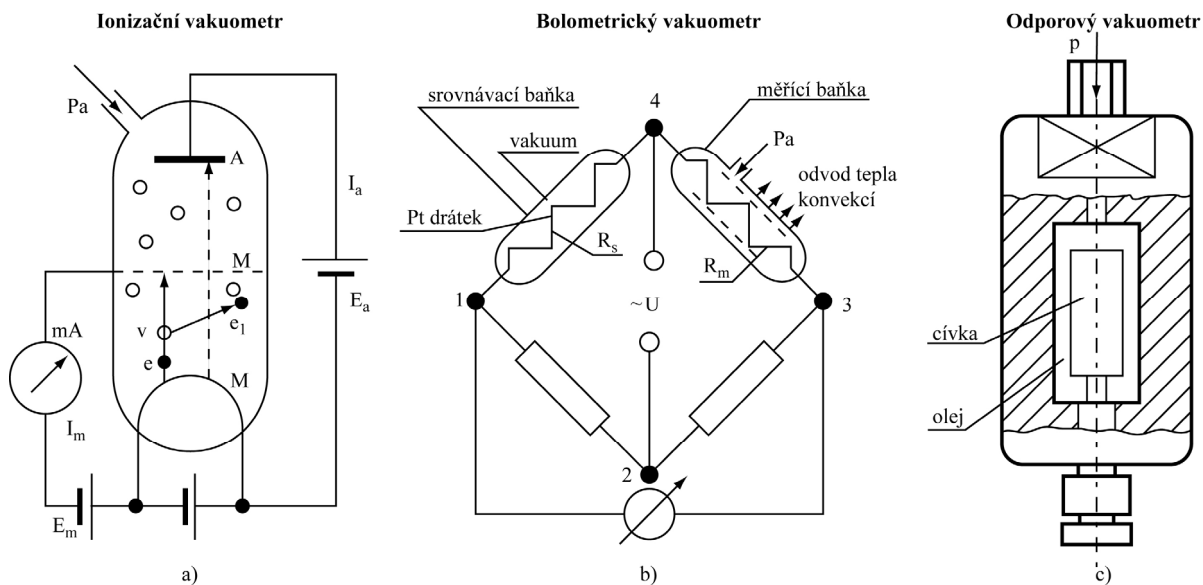
**Ionizační vakuometry** jsou zařízení, v nichž dochází k ionizaci plynů, přičemž proud iontů, který se měří, je funkcí tlaku plynu. V literatuře se popisují tyto typy ionizačních vakuometrů: se studenou katodou, se žhavenou katodou a radioizotopový. Zde uvedeme princip posledních dvou vakuometrů.

**Ionizační vakuometr se žhavenou katodou** pracuje na principu triody, obr. 12.4a. Medium, jehož tlak měříme, se zavádí do baňky. Přímou žhavenou katodu  $K$  emituje proud elektronů  $e$  (od několika  $\mu\text{A}$  do cca 10 mA), které jsou urychlovány napětím 80 až 120 V k anodě  $A$  a při srážce s molekulou vzduchu  $v$  vyráží z jejího obalu elektron  $e_1$ . Tímto způsobem ionizované molekuly vzduchu jsou odsávány záporným kolektorem iontů (mřížkou  $M$ ) a jejich proud  $I_m$  je mírou absolutního tlaku  $p_a$ . Měřicí rozsah je  $10^{-1}$  až  $10^{-11}$  Pa, přesnost cca 10%.

U **radioizotopového vakuometru** dochází k ionizaci média nárazy částice  $\alpha$  z radia ve slitině se zlatem nebo částicemi  $\beta$  z tritia absorbovaného v titanu. Měřicí rozsah bývá v rozmezí od cca 2 kPa do  $10^{-1}$  Pa.

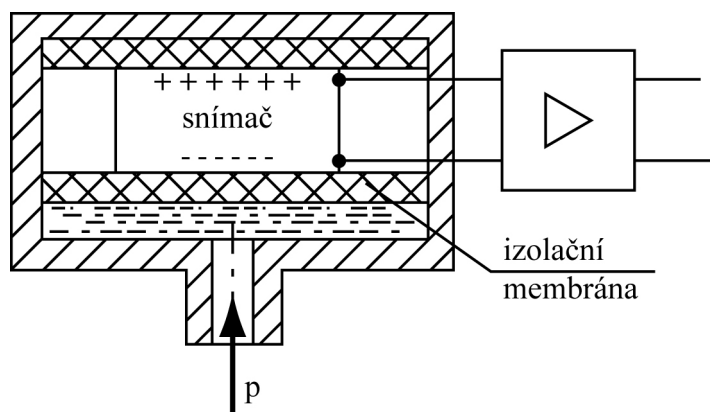
**Bolometrický vakuometr** využívá lineární závislosti tepelné vodivosti plynu na jeho tlaku v rozmezí  $10^{-4}$  až  $10^{-2}$  Pa. Dvě baňky se zatavenými platinovými drátky ( $\phi$  0,01 mm), ohřívány elektricky na teplotu 200 až 300°C, tvoří dvě větve Wheatstonova můstku (obr. 12.4b). Srovnávací baňka je zcela evakuována, měřicí je spojena s prostorem, v němž se měří tlak  $p_a$ . Drátek v měřicí bance se ochlazuje konvekcí (přenášením tepla s prostředím) vzduchu a přestupem tepla do okolí. Míra ochlazování je úměrná tepelné vodivosti vzduchu, která závisí na počtu molekul a tedy na tlaku  $p_a$ . Teplota drátku ve srovnávací bance se nemění (v bance je vakuum – nulová konvekce). Teploty obou drátků se měří nepřímo z odporů  $R_m$ ,  $R_s$  drátků. V důsledku rozdílu ( $R_m - R_s$ ), který je funkcí tlaku  $p$ , se můstek rozváží. Tlak  $p$  je úměrný velikosti rozvážení můstku.

**Odporové manometry** jsou založeny na měření změn odporu vodiče v závislosti na jeho stlačování tlakem. Tato závislost je lineární, ovšem s malým gradientem. Schéma uspořádání odporového manometru je na obr. 12.4c. Cívka z odporového drátu je ponořena do olejové lázně v silnostěnné nádobě. Jako materiál drátu se používají kovy s malou závislostí odporu na teplotě (manganin, nikelin, konstantan). Tlak zavedený do komory zmenšuje elektrický odpor drátu v důsledku jeho stlačování. Měřicí rozsahy jsou od 80 do 3000 MPa.



obr. 12.4

**Piezelektrický snímač tlaku.** Schéma piezelektrického snímače tlaku na obr. 12.5 a principiálně je shodné s piezelektrickým snímačem sil. Je vhodný pro měření rychlých, časově proměnných tlakových změn (tlaky ve válcích spalovacích motorů, v průtočných částech turbin a kompresorů, tlakové rázy v potrubích apod.). Rezonanční frekvence bývají ve stovkách kHz, maximální měřitelné tlaky jsou kolem 500 MPa při miniaturních rozměrech (průměr cca 8 mm). Při měření tlakových rázů je nutné řešit problém působení zrychlení na membránu oddělující tlakový prostor od piezelektrického snímače, což se provádí kompenzačním piezelektrickým snímačem zrychlení, který je součástí snímače tlaku.



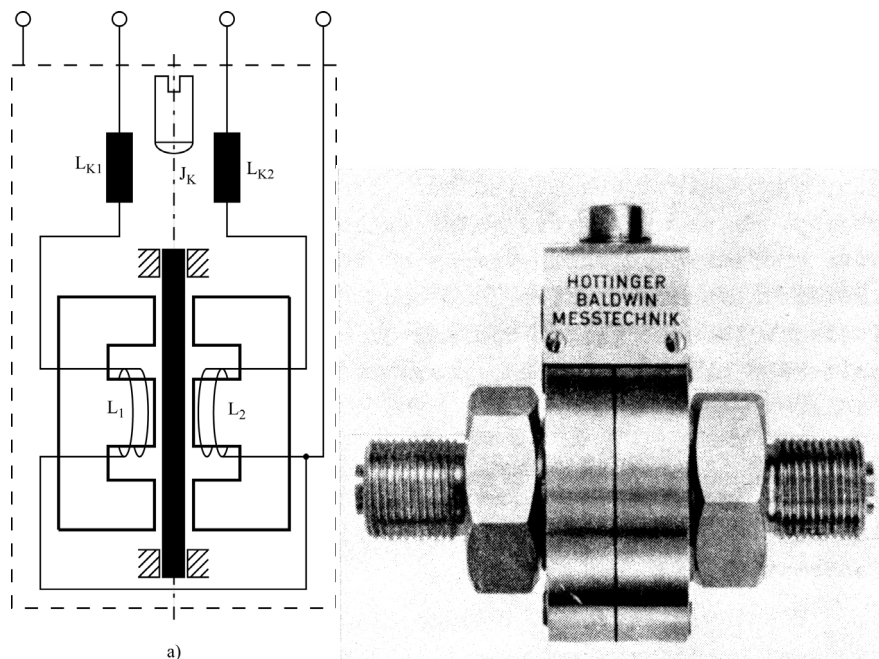
obr. 12.5

#### 4. Snímače tlaku s mechanicko-elektrickými převodníky

Vývoj snímačů tlaku se v posledních letech vyvíjí směrem převodu tlaku na deformaci nebo posuv měřícího prvku vhodného tvaru (nosník, membrána, vlnovec), které se převádějí na určitou elektrickou veličinu (indukčnost, kapacitu, odpor,...) Vývojové tendence směřují ke zlepšení metrologických vlastností snímačů tlaku, jsou zaměřeny na nové konstrukce a materiály měřících prvků a na jejich geometrickou konfiguraci v návaznosti na měřící řetězec.

Mezi nejvíce rozšířené snímače tlaku patří ty, jejichž měřícím prvkem je **membrána**, která se při zatížení měřeným tlakem deformuje. K měření tlaku se využívají buď délková přetvoření na povrchu membrány, nebo její průhyb. Obě veličiny jsou funkcí její geometrie, vazeb, materiálových charakteristik a zatěžujícího tlaku. Velikost délkových přetvoření lze

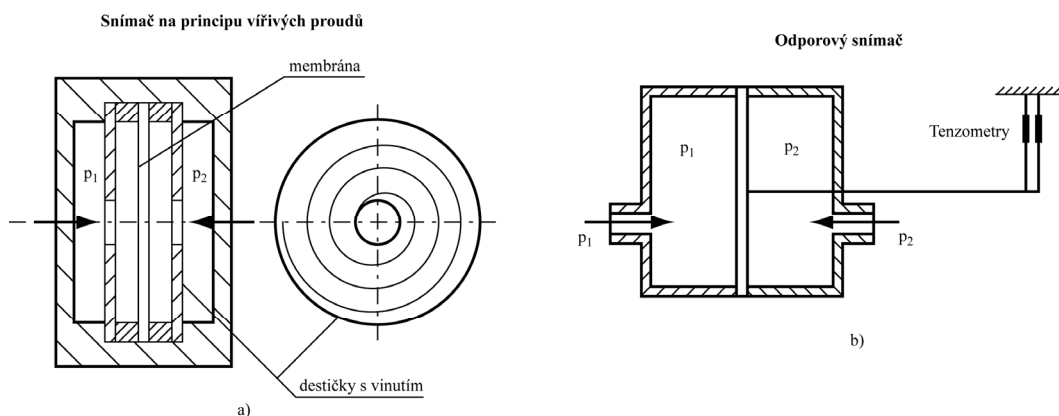




obr. 12.7

- **měření průhybu** membrány indukčnostními **snímači na principu vířivých proudů**. Membrána z vodivého materiálu je umístěna mezi dvě cívky vytvořené technikou plošných spojů ve tvaru ploché spirály na izolačním podkladě, obr. 12.8a. Snímač má jednoduchou konstrukci a výrobu.

c) **Odporové snímače** průhybu membrány, používající odporových potenciometrů s pohyblivým jezdcem patří mezi dnes již zastaralé principy. Na obr. 12.8b je schéma snímače, u něhož se průhyb membrány převádí na deformační zatížení prutu, který je významně namáhán na ohyb. Na povrchu prutu jsou umístěny odporové tenzometrické snímače, jejichž signál je úměrný posuvu membrány a tím i tlaku, který na membránu působí.



obr. 12.8

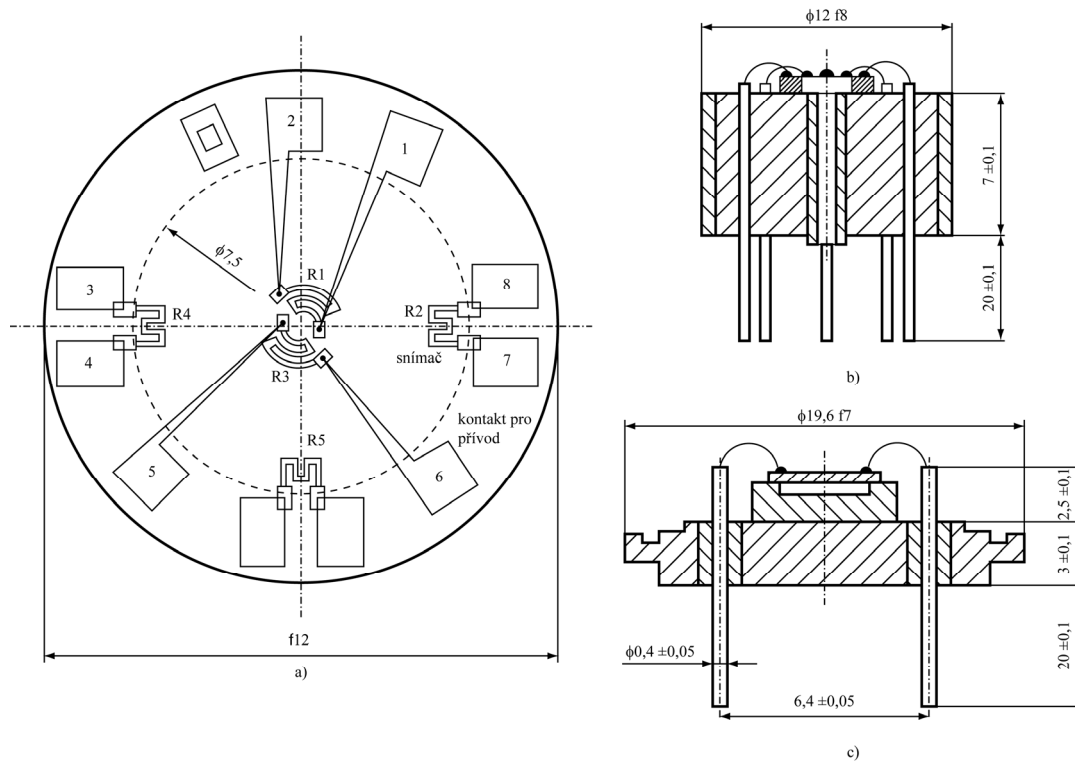
### 5) Snímače tlaku s difundovanými polovodičovými tenzometry

U těchto tlakových čidel je základním měřicím prvkem křemíková kruhová membrána vyrobená z křemíkové destičky typu n orientované v rovině  $[1\ 1\ 1]$  a využívá se piezorezistence v difusních vrstvách polovodiče. Při výrobě jde o vytvoření tenké vrstvy nečistot difuzí do monokrystalu polovodiče (tzv. **iontová implantace**) způsobující opačný typ vodivosti než má křemíková membrána (v našem případě vodivosti typu p). Tloušťka vytvořené vrstvy je několik  $\mu\text{m}$  a povrchová koncentrace příměsí u snímačů je cca  $1,5 \cdot 10^{17}$

atomů/mm<sup>3</sup>. Obecně povrchová koncentrace příměsí určuje součinitel deformační citlivosti a jeho teplotní závislost. Na rozhraní mezi difundovaným polovodičovým tenzometrem a základním materiálem vznikne přechod n-p (resp. p-n), který plní funkci elektrického izolantu. Tenzometry jsou na povrchu membrány orientovány ve směru radiálním a obvodovém a zapojeny do Wheatstonova můstku buď přímo na čidle, nebo jednotlivě vyvedeny a pak zapojeny. Membrány s vytvořenými tenzometry jsou připevněny na kovarovou základnu tzv. anodickým pájením. Vývody od tenzometrů jsou provedeny zlatým drátem, tzv. ultrazvukovou kompresí a jsou spojeny s kolíky vestavěnými do základny snímače. Poslední technologickou operací je nanášení ochranné vrstvy – nízkoteplotního plazmatického nitridu křemíku, která má zvýšit dlouhodobou stabilitu a spolehlivost čidla.

Na obr. 12.9a je znázorněna membrána tlakového čidla. Tenzometry *R1* až *R4* jsou aktivní tenzometry, tenzometr *R5* lze použít pro kompenzační účely. Plošky *1* až *8* slouží pro kontaktování vývodů od tenzometrů.

U polovodičových tlakových čidel je nutné kompenzovat nulovou výchylku (tj. výstupní napětí při nulovém tlaku) a teplotou. Pro tlaky do 10<sup>7</sup> Pa se tlaková čidla umísťují na základny dle obr. 12.9b, pro tlaky vyšší – dlouhodobě do tlaku 7.10<sup>7</sup> Pa a krátkodobě do tlaku 12.10<sup>7</sup> Pa se používá základna dle obr. 12.9c.

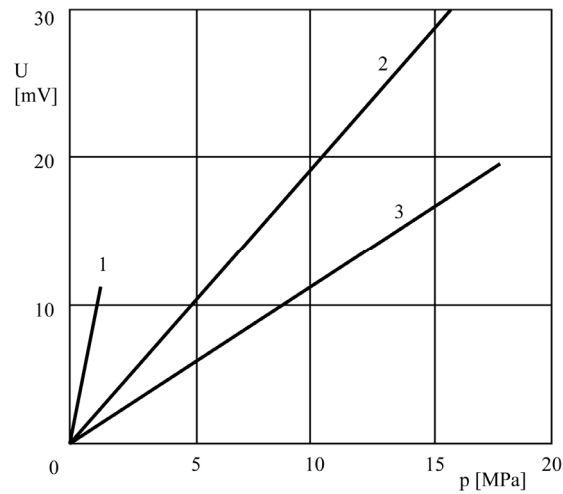


obr. 12.9

## 6) Snímače tlaku s tenkými kovovými vrstvami

Snímače na bázi tenkých vrstev jsou založeny na piezorezistentním jevu. Tento je závislý na tloušťce a krystalické struktuře tenké vrstvy. Pro vytvoření tenké vrstvy se používá NiCr (k-faktor 2), CuNi (2,2), Cermety (3 až 65), TiON (4 až 6), GeAu (30). Snímače tlaku lze vytvářet těmito technologiemi: vakuovým napařováním, katodovým napařováním a chemickou depozicí z plynné fáze na membránách nebo nosících z ocele, resp. skla (alumioborosilikátové sklo Corning 7059). Napařované snímače s tenkými vrstvami mají lepší statické vlastnosti než snímače foliové nebo polovodičové, (hystereze 0,05%, změna citlivosti a posuv nuly s teplotou 0,01%/°C) a stálost parametrů v rozsahu teplot 150 až 300°C. Typické závislosti výstupního napětí ze snímače v závislosti na tlaku jsou na obr. 12.10. Jsou závislé na materiálu podkladu a na topologii snímače. Příímka *1* je pro skleněný

podklad a páskový snímač, 2 pro kovový základ a ruzice, 3 – kovový základ a páskový snímač. Nominální odpory snímačů jsou v rozmezí 500 až 2000  $\Omega$ .



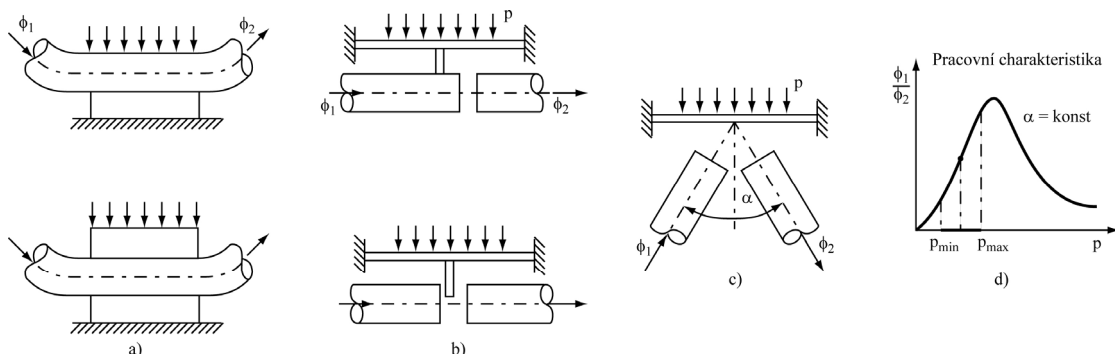
obr. 12.10

### 7) Světlovodné snímače tlaku

Při sledování parazitních vlivů (teplota, tlak deformace, vibrace,...) na funkci světlovodu přišli odborníci k závěru, že by se těchto vlivů dalo využít ke konstrukci snímačů fyzikálních veličin. Zde se budeme zabývat světlovodnými snímači tlaku. Podle důsledku působení tlaku na světlovod, podle způsobu změny signálu procházejícího světlovodem, rozdělujeme světlovodné snímače na tyto skupiny:

- změna útlumu signálu způsobená tlakem bez přerušení světlovodu; může se jednat o přímé působení tlaku na světlovod nebo působení přes deformační člen (obr. 12.11a),
- změna vazby u přerušeného světlovodu – posunutím jednoho světlovodu nebo posunutím clony v místě přerušení světlovodu (obr. 12.11b),
- změna intenzity odrazu (obr. 12.11c).

Pro ilustraci uvádíme na obr. 12.11d pracovní charakteristiku snímače dle obr. 12.11c. Vhodnou volbou úhlu  $\alpha$  lze měnit tvar a rozsah přibližné linearitě závislosti „ $\phi_1/\phi_2 - p$ “. Světlovodné snímače tlaku mají vysokou citlivost (100 mV/MPa), subminiaturní rozměry a umožňují měřit velmi rychlé tlakové změny.



obr. 12.11

## 12.5 Měřicí metody pro určování teploty

### 12.5.1 Úvod

Teplota je stavovou veličinou, která kvantitativně charakterizuje tepelný stav látky (tělesa). Podle kinetické teorie je mírou velikosti střední kinetická energie neuspořádaně se



pohybujících atomů. U teploty rozlišujeme její intenzitu a interval. Intenzita teploty se určuje srovnáváním daného stavu s teplotní stupnicí. Vytvoření teplotní stupnice umožňují některé fyzikální zákony. Z ideálního Carnotova cyklu je odvozena tzv. **termodynamická stupnice**, z Charlesova zákona pro izochorický děj ideálního plynu pak tzv. **plynová stupnice**. Obtížnost termodynamických měření a měření s plynovými teploměry, které jsou nutné pro realizaci uvedených teplotních stupnic, vedly k tomu, že byla vypracována tzv. **mezinárodní praktická teplotní stupnice IPTS<sub>68</sub>** (roky 1948, 1968, 1980) tak, aby co nejpřesněji vyjadřovala teploty příslušné k termodynamické stupnici. Tato empirická stupnice je stanovena na pevně definovaných (primárních) bodech v termodynamické stupnici, které odpovídají rovnovážným stavům mezi fázemi vybraných látek a na doplňujících (sekundárních) bodech. Teploty jsou udávány ve stupních Kelvina nebo Celsia. Stupeň Kelvina je definován jako 273,16 díl teplotního rozdílu mezi absolutní nulou ( $T = 0$  K) a teplotou trojného bodu ( $T = T_r = 273,16$  K) vody, měřený v termodynamické stupnici teplot. Celsiova teplota  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) se odvozuje z hodnoty termodynamické teploty  $T$  z definičního vztahu:

$$t = T - 273,16 [^{\circ}\text{C}]$$

Primární a sekundární body při normálním tlaku  $p_0 = 101\,325$  Pa jsou uvedeny v Tab. 12.3. U mezinárodní stupnice jsou zákonně stanoveny i způsoby interpolace mezi určitými teplotními úseky. Používají se etalonové platinové teploměry, etalonové termoelektrické teploměry PtRh 10 – Pt a etalonový jasový pyrometr. Stupnice IPTS<sub>68</sub> je u nás realizována ČMI.

Pro měření teploty je v zásadě možno využít libovolného měřitelného fyzikálního procesu, jehož průběh výrazně a jednoznačně závisí na teplotě.

Měření teploty se realizuje **teploměry**, jejichž členění je uvedeno v Tab. 12.4. Dotykové teploměry jsou v přímém styku a měřeným prostředím, bezdotykové jsou umístěny v určité vzdálenosti od měřeného prostředí. Zvláštní teploměry jsou založeny na specifických změnách fyzikálních vlastností látek s teplotou. Měřicí intervaly jednotlivých typů teploměrů jsou uvedeny na obr. 12.12.

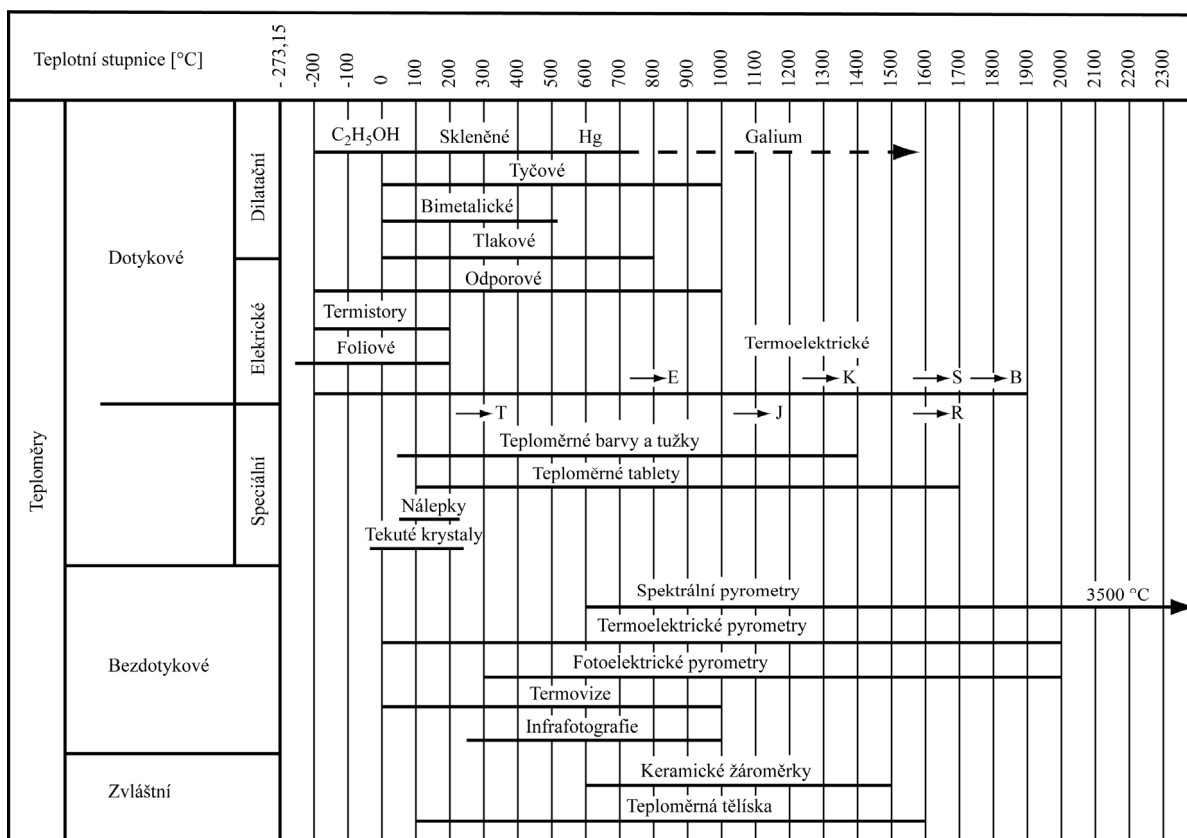
Z hlediska zaměření tohoto skriptu (základní a specializované studium s ohledem na mechaniku těles) budeme se zabývat zejména elektrickými dotykovými teploměry a z bezdotykových termovizí. U ostatních typů teploměrů uvedeme pouze jejich fyzikální princip.

<b>Primární body</b>	$^{\circ}\text{C}$
1. Bod varu kyslíku	-182,97
2. Trojný bod vody	0,01
3. Bod varu vody	100,00
4. Bod varu síry	444,60
5. Bod tuhnutí zlata	1063,00
<b>Sekundární body</b>	$^{\circ}\text{C}$
1. Bod tuhnutí rtuti	-38,87
2. Trojný bod kyseliny benzoové	122,36
3. Bod tuhnutí cínu	231,91
4. Bod tuhnutí antimonu	630,50
5. Bod tuhnutí niklu	1452
6. Bod tuhnutí platiny	1769
7. Bod tuhnutí rhodia	1960
8. Bod tuhnutí iridia	2443
9. Bod tuhnutí wolframu	3380

Tab. 12.3

	Členění teploměrů	
Dotykové	Bezdotykové	Zvláštní
Dilatační (skleněné, tlakové, tyčové dvojkovové)	Pyrometry (spektrální – jasové, radiační, fotoelektrické)	Keramické žároměrky
Elektrické (odporové, termoelektrické, foliové)	Infrafotografie	Teploměrná tělíska
Speciální (krystalové, tekuté krystaly, teploměrné barvy, tužky, nálepky, tablety).	Termovize	

Tab. 12.4  
Měřicí intervaly teplot u různých typů teploměrů



obr. 12.12

## 12.5.2 Neelektrické dotykové metody pro určování teploty

### a) Dilatační teploměry

Princip těchto teploměrů spočívá v roztažnosti látek všech skupenství v závislosti na teplotě. Podle toho, v jakém skupenství je příslušná látka, rozeznáváme tyto typy dilatačních teploměrů:

#### Skleněné teploměry

Skleněné teploměry využívají objemové roztažnosti kapaliny s teplotou, přičemž teplota se stanovuje z výšky této hladiny ve skleněné kapiláře. Teploměrné kapaliny, kterými se plní teploměry, jsou velmi různorodé. Umožňují měření v rozsazích: spodní hranice cca -200°C (pentan), horní hranice 630°C (rtuť), výjimečně cca 1500°C (galium). Stupnice skleněných

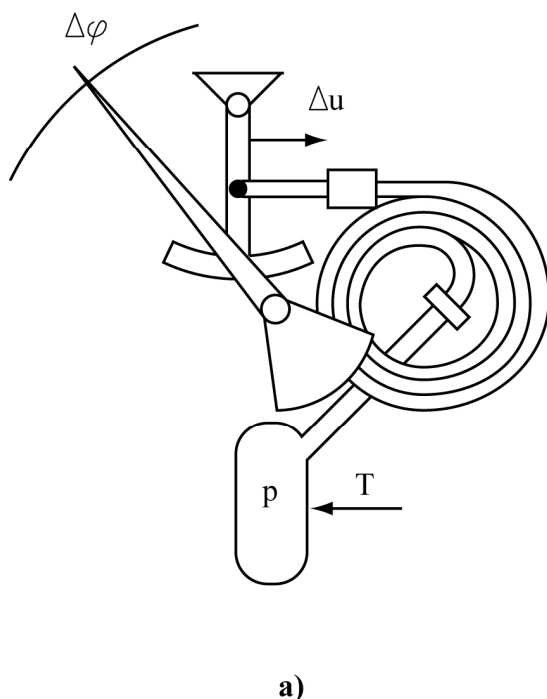
teploměru bývá stanovena při plném ponoru kapalinového sloupce. Jestliže při měření není ponořen celý sloupec, je nutné provádět tzv. **korekci na vyčnívající vlákno**.

### Deformační teploměry

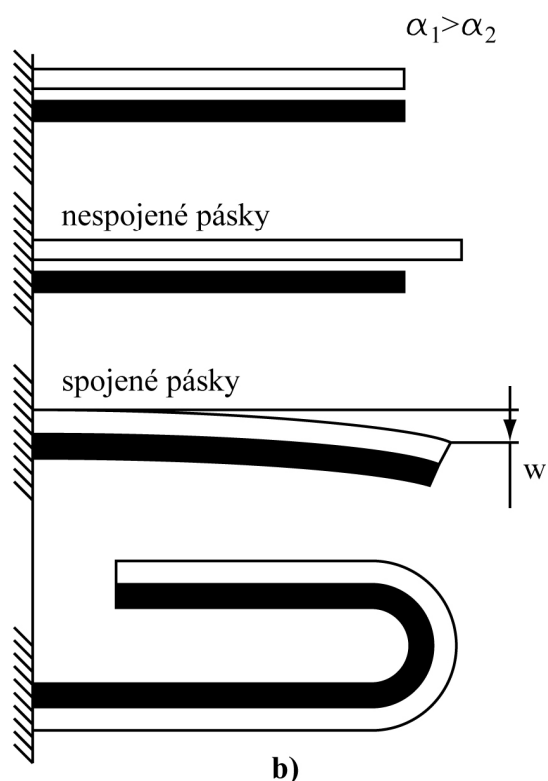
Měřítkem změny teploty je deformace pružného prvku způsobená touto změnou. Deformační teploměry lze členit na tyto typy:

- **kapalinové tlakově teploměry** – jsou obdobou deformačních tlakoměrů. Měřicí prvek (obvykle stočená spirála – obr. 12.13a) je zcela naplněn teploměrnou kapalinou. Při konstantním objemu kapaliny dochází změnou teploty ke změně tlaku, který deformuje měřicí prvek a tato deformace se přenáší na ukazatel s teplotní stupnicí.
- **parní tlakově teploměry** – obdoba kapalinových – částečně jsou naplněny kapalinou a v prostoru nad ní sytou parou této kapaliny. Změna teploty vyvolá změnu tlaku nasycených par a tento deformuje měřicí prvek.
- **dvojkovové teploměry (bimetal)** – teploměrným prvkem je dvojice pevně spojených pásků z kovových materiálů s rozdílným teplotním součinitelem roztažnosti, která se v důsledku omezené deformace vzájemným spojením deformuje jinak, než by odpovídalo volné deformaci (dva nespojené pásky s různým  $\alpha$  se ohřevem prodlužují, vzájemně spojené pásky se ohýbají, obr. 12.13b). Posuv volných konců bimetalů se indikuje přes mechanický převod.

#### kapalinový tlakový teploměr



#### dvojkovové teploměry - bimetal



obr. 12.13

### Plynové teploměry

využívají dvou fyzikálních zákonů:

- změny objemu plynu s teplotou při konstantním tlaku (izobarický děj)
- změny tlaku plynu s teplotou při konstantním objemu (izochorický děj).

## b) Krystalové teploměry

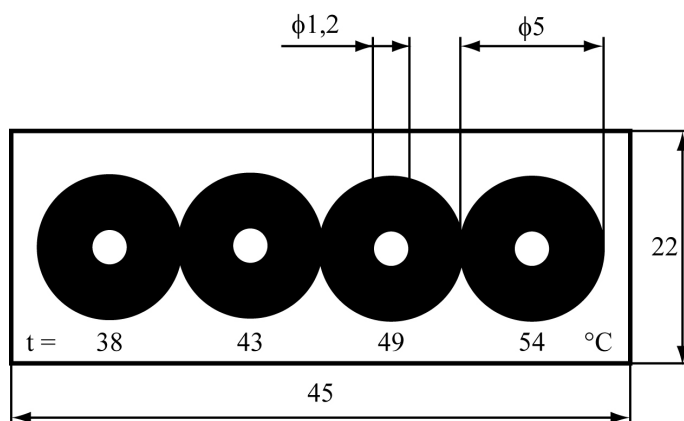
Měřítkem změny teploty je změna rezonančního kmitočtu speciálně upraveného krystalového výbrusu (křemíku) v závislosti na teplotě. Citlivost je 1 kHz na 1°C, rozlišovací schopnost teploměru od  $10^{-1}$  do  $10^{-4}$ °C.

## c) Teploměry na bázi tekutých krystalů

Jedná se o barevné teplotní indikátory na bázi kapalných krystalů cholesterického typu – jsou to kapaliny s jistým stupněm pravidelného uspořádání molekul, z čehož vyplývá anizotropie optických, mechanických, elektrických a magnetických vlastností. Orientace molekul je teplotně závislá, což při osvětlení bílým světlem způsobuje barevné interferenční pruhy – tyto barevné změny jsou vratné. Jejich použití je od -20 do 250°C. Přesnost měření je určena šířkou teplotního intervalu pro změnu orientace, která se pohybuje od 0,1°C do desítek stupňů. Nanášejí se na povrch tělesa v tloušťce řádové  $10^{-2}$ mm.

## d) Barevné teplotní indikátory

jsou založeny na principu barevné změny určité látky při dosažení tzv. **teploty zvratu**. Patří mezi ně teploměrné barvy, tužky a nálepky. Barvy a tužky se nanášejí na povrch. Přesnost měření je cca 5°C. Nálepky jsou černé proužky s bílým středem (indikační okénko), který při dosažení bodu zvratu zčerná. Provedení nálepky je na Obr. 12.14. Uvedené indikátory se používají i tam, kde není možné použít elektrické teploměry.



Obr. 12.14

## 12.5.3 Elektrické teploměry

Elektrické teploměry využívají změny elektrických vlastností materiálu měřícího prvku v závislosti na teplotě. Podle principu této změny je dělíme do dvou hlavních skupin: teploměry odporové a teploměry termoelektrické (termočlánky).

### a) Odporové teploměry

K měření teploty odporovými teploměry se využívá teplotní závislosti elektrického odporu kovových vodičů a polovodičů. Typické teplotní závislosti odporů některých používaných materiálů jsou známy z předmětu Fyzika.

#### *Kovové odporové teploměry*

Pro výrobu čidel kovových odporových teploměru se používají čisté kovy uvedené v Tab. 12.5 Teplotní závislost odporu materiálu vyjadřuje tzv. **teplotní součinitel odporu**  $\alpha_R$  [K<sup>-1</sup>], jehož střední hodnotu pro teplotní rozsah 0 až 100°C lze určit ze vztahu:

$$\alpha_R = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}$$

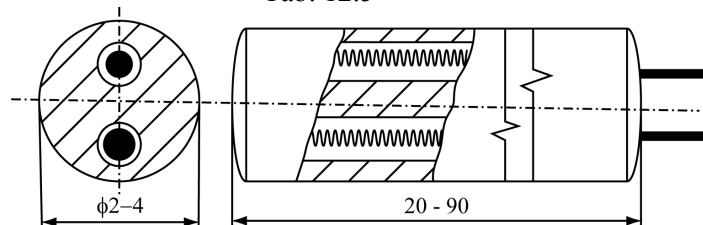
kde  $R_0$  a  $R_{100}$  jsou odpory materiálu při teplotách  $0^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ .

Největší  $\alpha_R$  má dle Tab. 12.5 železo a nikl, nejmenší platina. Přesto se železo a měď nepoužívají, poněvadž snadno oxidují. Nikl se používá jen pro nižší teploty, protože mezi  $300$  až  $400^\circ\text{C}$  vykazuje strukturální změny ovlivňující teplotní změnu odporu. Nejčastěji se používá platina pro její chemickou netečnost, vysokou teplotu tání, časovou a teplotní stálost vlastností. Platinové měřicí odpory se vyrábějí v nejrůznějších provedeních:

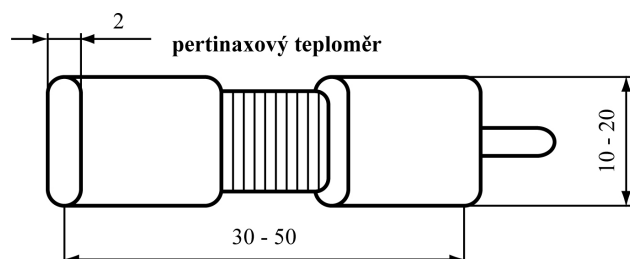
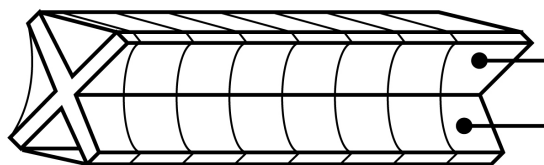
- **keramické** – Pt – drátek o průměru  $0,05\text{mm}$  je stočen do spirály a zataven do keramického pouzdra (obr. 12.15). Používají se do teplot  $+850^\circ\text{C}$ , zejména jako snímače teplot do jímek
- **skleněné** – používají se do teplot  $+600^\circ\text{C}$  pro měření v jímkách,
- **pertinaxové** – použití do  $150^\circ\text{C}$  pro měření teploty okolí, povrchových teplot, teplot vinutí a elektrických strojů apod.
- **tištěné** – tisk se provádí na plochou korundovou podložku, pokrytou vrstvou speciálního skla. Natištěná vrstva platiny ve tvaru jednoduchého meandru je k podložce přitavena laserovou technikou. Tištěný odpor má tvar plochého pásku o rozměrech  $3 \times 30\text{mm}$ . Používá se k měření povrchových teplot.

Materiál	$\alpha_R \cdot 10^2 [K^{-1}]$	$10^8 \rho [\Omega\text{m}]$	Teplotní rozsah [ $^\circ\text{C}$ ]
Platina	0,385 – 0,391	9,81	-200 – +600 (800)
Nikl	0,617 – 0,675	12,13	-70 – +150 (200)
Měď	0,426 – 0,433	1,54	-50 – +150
Železo	0,657	9,07	0 – +100

Tab. 12.5



keramický otevřený



obr. 12.15

## Srovnání odporových teploměrů s jinými typy teploměrných čidel.

### Výhody:

- větší signál a vyšší přesnost v porovnání s termočládky, takže vyžadují levnější záznamovou aparaturu,
- lineární odporově – teplotní charakteristiky ve srovnání s nelineárními charakteristikami u termistoru.

### Nevýhody:

- velké rozměry v porovnání s termočládky i termistory,
- dražší základní čidlo,
- jsou méně citlivější než termistory,
- nelze je používat pro vyšší teploty než termočládky.

### b) Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové snímače teploty se podle typu materiálu použitého čidla člení na tyto základní skupiny:

- a. **polykrystalické** – patří sem tzv. termistory (členěné dále na negistory a posistory),
- b. **monokrystalické** – řadí se sem snímače bez p-n přechodu a s p-n přechodem, což jsou tzv. diodové teploměry.

**Termistory** jsou polovodičové materiály vyráběné keramickými metodami z práškových materiálů (NiO, TiO<sub>2</sub>, CuO, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Vhodnou vlastností termistoru je značná relativní změna odporu v závislosti na teplotě (teplotní koeficient odporu), která je 5 až 50x větší než u kovových vodičů. Lze z nich zhotovit čidla s velkým odporem (vliv odporu přívodů je pak zanedbatelný) a s minimálními rozměry, takže je lze použít pro bodová měření teploty.

Termistory se podle znaménka součinitele  $\alpha_R$  člení na **negistory**-HTC ( $\alpha_R < 0$ ), a **posistory** – PTC ( $\alpha_R > 0$ ). Oba typy se vyznačují výraznou nelineární závislostí na teplotě (obr. 12.16a), ( $R_0$  je odpor při 0°C).

Jelikož při výrobě nelze zajistit stejné vlastnosti termistorů, musí se každý snímač cejchovat. Pro měření teploty se používají pouze negistory, kterým byl ponechán širší název termistory. Změnu odporu termistoru s teplotou lze vyjádřit vztahem:

$$R = Ae^{B/T} \quad (12.5)$$

kde  $A$  je konstanta závislá na tvaru a materiálu čidla

$B$  je materiálovou konstanta, která se určuje z podmínek  $T = T_1, R = R_1, T = T_2, R = R_2$ , takže  $B$  je dáno vztahem

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

U termistorů se uvádí teplotní součinitel vztahem

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT},$$

dosadíme-li ze vztahu (12.5), máme

$$\alpha_R = -\frac{B}{T^2}$$

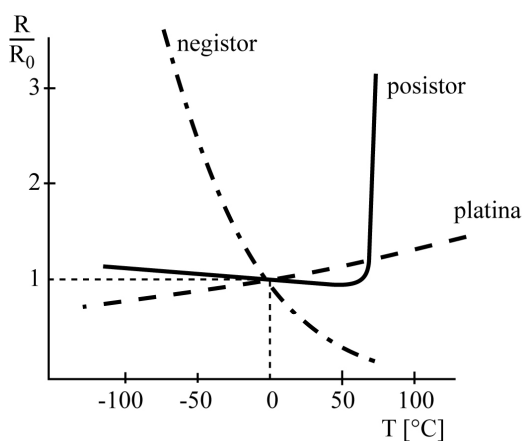
Tento vztah je graficky znázorněn na obr. 12.16 b pro různé hodnoty B. Výrobci termistorů v Evropě udávají hodnoty B pro teploty  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  a  $T_2 = 85^\circ\text{C}$ . Linearizace charakteristiky termistoru lze docílit přiřazením paralelního a sériového odporu podle obr. 12.17. Paralelním odporem  $R_p$  se nastaví ukazatel na počátku stupnice, sériovým  $R_s$  na konci stupnice. Tím lze docílit záměnnosti čidel s nesterjnými charakteristikami a tím odstranit výrobní rozptyl termistoru za cenu snížené citlivosti. Hodnoty odporů  $R_p$ ,  $R_s$  jsou dány vztahy:

$$R_p = \frac{R_0}{1 - \sqrt{\frac{B_0 R_0}{BR}}}; \quad R_s = R_0 \sqrt{\frac{BR}{B_0 R_0}}$$

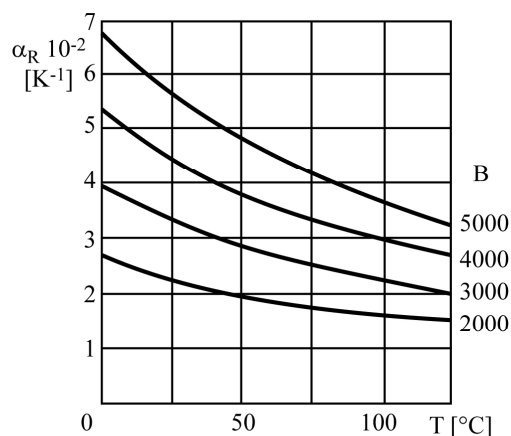
kde  $R_0, B_0$  jsou požadované hodnoty při dané teplotě,

$R, B$  jsou skutečné hodnoty.

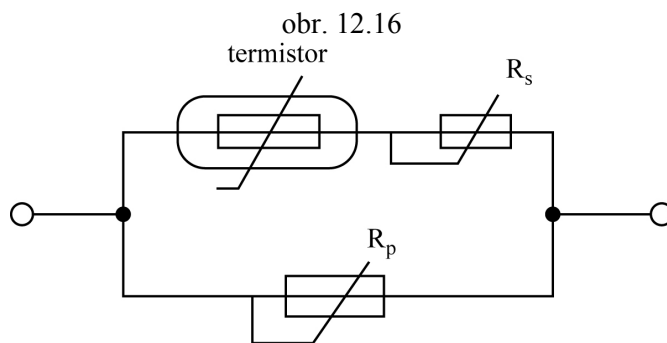
Provedení polovodičových teploměrů v tzv. perličkovém provedení je na obr. 12.18



a)

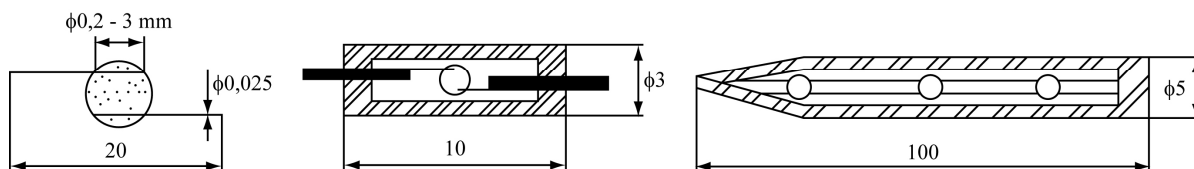


b)



obr. 12.17

Perličkové provedení polovodičových teploměrů



obr. 12.18

### c) Diodové teploměry

K měření teploty se využívá teplotní závislosti úbytku diodového napětí  $U_D$  při průchodu konstantního proudu  $I_D$  v propustném směru. Teplotní citlivost diody závisí na typu diody a na velikosti proudu a bývá v rozmezí:

$$\frac{U_D}{\Delta T} = (1,5 - 3,5) mV \cdot K^{-1}$$

#### d) Termoelektrické teploměry (termočlánky)

Tento typ teploměrů využívá k měření teploty tzv. **termoelektrického jevu**, který lze vymezit takto:

v obvodu vytvořeném dvěma dráty z různých materiálů (tzv. termoelektrický článek), které jsou na svých koncích elektricky vodivě spojeny, vznikne termoelektrický proud, jestliže teploty spojených konců jsou vzájemně odlišné.

Rozpojením obvodu vznikne termoelektrické napětí  $e$ , které lze měřit. **Podstata** termoelektrického jevu **souvisí s koncentrací volných elektronů**, která je u různých materiálů různá. Jestliže se jeden spoj obvodu udržuje na stejné teplotě  $t_s$  (je to tzv. **studený spoj**, nebo **srovnávací spoj**), pak hodnota napětí  $e$  závisí na teplotě  $t_m$  druhého spoje (je to tzv. **teplý spoj** nebo **měřící spoj**). Závislost mezi napětím  $e$  a teplotním rozdílem  $\Delta T = t_m - t_s$  se aproximuje polynomickou závislostí:

$$e = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T + \frac{1}{2} (\beta_1 - \beta_2) (\Delta T)^2$$

kde  $t_m$  je teplota měřícího spoje,

$t_s$  je teplota srovnávacího spoje,

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  jsou konstanty materiálů termoelektrického článku určované experimentálně.

Obvykle se závislost  $e(\Delta T)$  udává ve formě tabulek nebo grafů, resp. je obsažena v databankách počítače.

Ke konstrukci článků lze v zásadě použít libovolnou kombinaci dvou kovů, jestliže splňují tyto požadavky:

- vznik relativně vysokého termoelektrického napětí,
- závislost  $e(\Delta T)$  co nejvíce se blíží lineární závislosti,
- odolnost proti korozi, mechanickým a chemickým vlivům, případně žáruvzdornost,
- stabilitu časových a teplotních termoelektrických charakteristik.

Jednotlivé typy termočlánků mají svá označení písmeny a barvami. Přehled termočlánků vypracovaný mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) je uveden v Tab. 12.6. V této tabulce jsou černým kroužkem označeny termočlánky normalizované dle ČSN 35 6710. Dnes se již nevyrábí termočlánek niklchrom-nikl (NiCr-Ni), kdysi velmi rozšířený, který má stejné vlastnosti jako termočlánek K. Kromě uvedených termočlánků se vyrábějí termočlánky pro extrémně vysoké teploty. Patří sem:

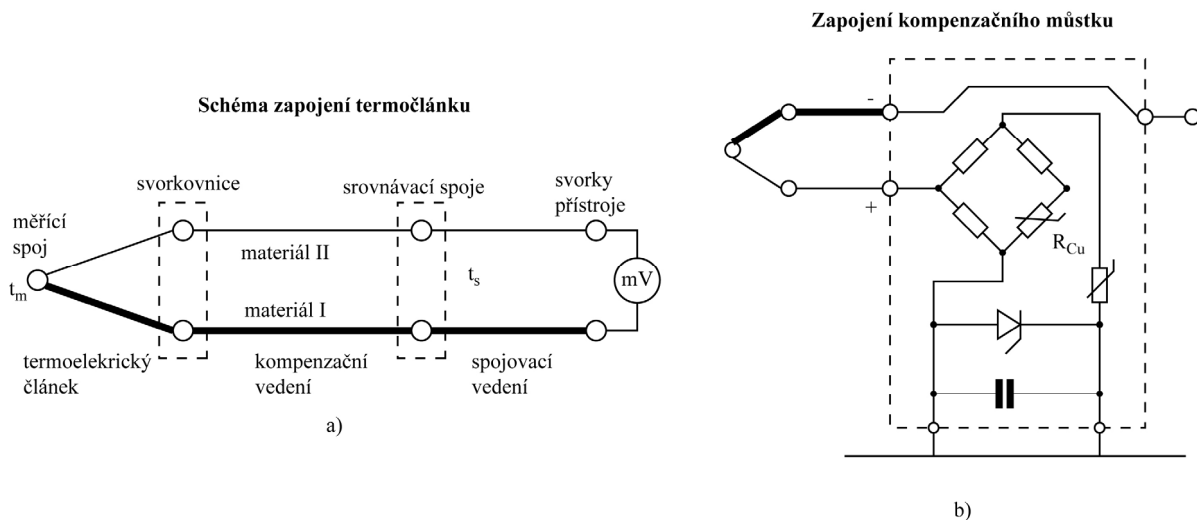
IrRh – Ir (Iridium Rhodium – Iridium) do 2000 °C  $\alpha = 7 \mu V^\circ C^{-1}$

W-WRe (Wolfram Rhenium – Wolfram) do 2500 °C  $\alpha = 20 \mu V^\circ C^{-1}$

Na obr. 12.19a je schéma zapojení termočlánku s názvoslovím dle ČSN. Termočlánek je prodloužen do srovnávacího místa tzv. **kompensačním vedením**, které je vyrobeno ze stejného materiálu jako termočlánek. Ve srovnávacím místě je tepelný zdroj, který vytváří srovnávací teplotu v laboratorních podmínkách, (je to např. lázeň s tajícím ledem 0 °C). Je



samozřejmě, že údaj termoelektrického teploměru je ovlivňován teplotou srovnávacích spojů. Pro měření v provozních podmínkách je tedy velmi důležitá kompenzace vlivu změny této teploty. Používá se buď **elektrické kompenzace** (tzv. kompenzační krabice) nebo **teplotní kompenzace** (termostat). Princip elektrické kompenzace teploty srovnávacích spojů spočívá v zapojení kompenzačního můstku v obvodu termočlánku podle obr. 12.19b. V tomto můstku se třemi konstantními odpory je zapojen měděný odpor  $R_{Cu}$ , jehož hodnota je závislá na teplotě. Můstek je vyvážen při teplotě  $+20^{\circ}C$ . Při změně okolní teploty se poruší rovnováha můstku a jeho úhlopříčkou začne protékat proud takového smyslu a velikosti, že kompenzuje úbytek, resp. přírůstek termoelektrického proudu a údaj přístroje se nezmění. Rozsah kompenzace je  $-10$  až  $+70^{\circ}C$ . Pro každý elektrický teploměr je nutná jedna kompenzační krabice.



obr. 12.19

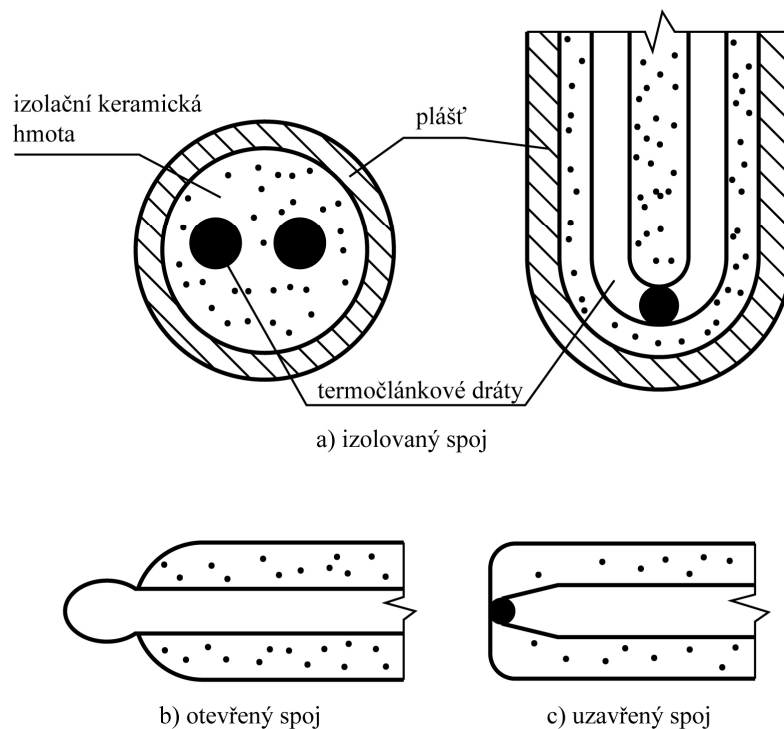
Při měření teploty více termočlánky je výhodnější použít **srovnávacího termostatu**, do něhož lze uložit až 12 různých srovnávacích termoelektrických článků. Teplota termostatu je udržována na  $50$  nebo  $70^{\circ}C$  s přesností  $\pm 0,2^{\circ}C$ . K průběžné kontrole správné funkce termočlánku se používá tzv. **pojistky termoelektrického článku**. Zvýší-li se odpor obvodu termočlánku (přerušení vodičů, velký opal na povrchu článku), sepne se pomocná relé ovládající ochranné obvody.

Termoelektrické napětí se měří výchylkovou nebo kompenzační metodou. V provozních měřeních se převážně používá automatických mostových zapisovacích kompenzátorů a liovým nebo bodovým zápisem.

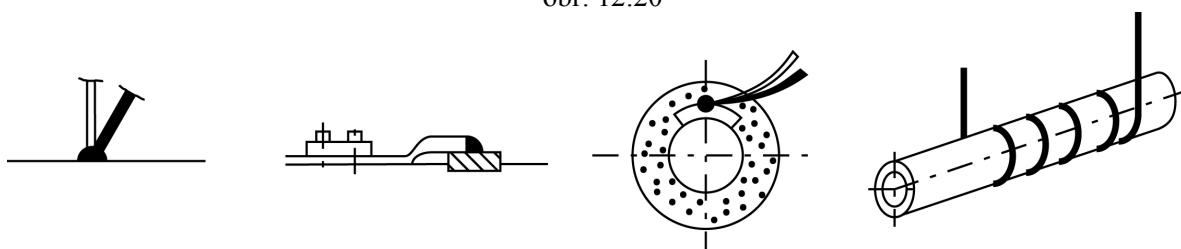
**Konstrukční provedení snímačů** – pro provozní měření jsou termoelektrické články umístěny v ochranné armatuře, která je konstrukčně shodná s armaturou pro odporové teploměry. Na obr. 12.20a je znázorněno tzv. **plášťové** provedení s izolovaným spojem termočlánku od pláště. Toto provedení má menší rychlost reakce na změnu teploty (velkou časovou konstantu  $T$ ). Má však menší pravděpodobnost porušení termočlánku od agresivity prostředí než další provedení na obr. 12.20 b a c, a to otevřený a uzavřený spoj. K izolaci vodičů uvnitř pláště se používá práškový oxid manganatý (má velký izolační odpor, je ale hygroskopický), nebo oxid hlinitý.

V mechanice těles nás především zajímají teploty na povrchu těles. Charakteristické způsoby připojení termočlánků na povrchu rovinného tělesa a na trubku jsou znázorněny na obr. 12.21. Při realizaci připojení je nutno dbát, aby bylo zamezeno přívodu a odvodu tepla snímačem a aby byl zajištěn dobrý přestup tepla mezi čidlem a měřeným povrchem.

### Konstrukční provedení snímačů



obr. 12.20



obr. 12.21

Označení	Materiály	Barevná označení	Dřívější označení	Rozsah teplot	$\alpha [K^{-1}]$ střední
T	Cu-CuNi	Oranžová	Cu-ko – měď konstantan		
J	Fe-CuNi	Černá	Fe-ko – železo konstantan	-200 – +300	
E	NiCr-CuNi	Hnědá	NiCr-ko – chrom kopel	-50 – +600	87
K	NiCr-NiAl	Žlutá	NiCr-Ni, ch-a Chromel – alumel	-200 – +900	42
S	Pt10Rh-Pt	Zelená	PtRh-Pt – platinorhodium – platina	0 – +1300	11
B	Pt30Rh-Pt60Rh	Fialová	PtRh18	+1000 – +1600	8,8

Tab. 12.6

## 12.5.4 Bezdotykové určování teplot

### a) Pyrometrické teploměry

jsou založeny na měření teploty v závislosti na množství vyzářené energie z povrchu měřeného tělesa v oblasti infračerveného záření v oblasti vlnových délek od 0,8 do 30  $\mu\text{m}$ , přičemž měřicí rozsah je -40 do 10 000  $^{\circ}\text{C}$ . Lze je členit podle různých kritérií, např. podle:

- využívané spektrální oblasti: na monochromatické, pásmové, úhrnné,
- používané vlnové délky záření: na ultrafialové, optické, infračervené a radiové,
- způsobu měření: na srovnávací (jasové), distribuční (barvová), radiační.

**Mezi nejčastěji používané patří tyto typy:**

**pyrometry úhrnné, radiační** – určují teplotu z celkového měřeného tepelného záření vyzařovaného povrchem tělesa v celém spektru vlnových délek,

**pyrometry pásmové** (fotoelektrické) – teplota se určuje z měření tepelného záření v úzkém pásmu vlnových délek, které je vymezeno použitou optikou a spektrální citlivostí snímačů,

**pyrometry spektrální** (jasové – k měření teploty) využívají úzkého spektrálního pásma v oblasti viditelného záření,

**pyrometry distribuční** (pásmové) se používají k měření teploty v oblasti viditelného záření.

### b) Fotografické měření teplot (fototermometrie)

Je bezkontaktní metodou pro měření teplotních polí na povrchu těles, založenou na citlivosti speciálního fotografického materiálu na infračervené záření ( $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$ ) vysílané povrchem tělesa. Vedle kvalitativního posouzení teplotních polí je možné i vyhodnocení kvantitativní, jestliže se spolu a měřeným povrchem vyfotografuje i tzv. **teplotní měřítko** (řada destiček s odlišnou známou teplotou). Měřicí rozsah metody je 250 až 1000  $^{\circ}\text{C}$  a rozlišovací schopnost – ploška o velikosti 0,25  $\text{mm}^2$ . Pro ilustraci uvádíme parametry při fotografování: expozice 1-25 s při cloně 1:2,8 pro střední teplotu cca 800  $^{\circ}\text{C}$ .

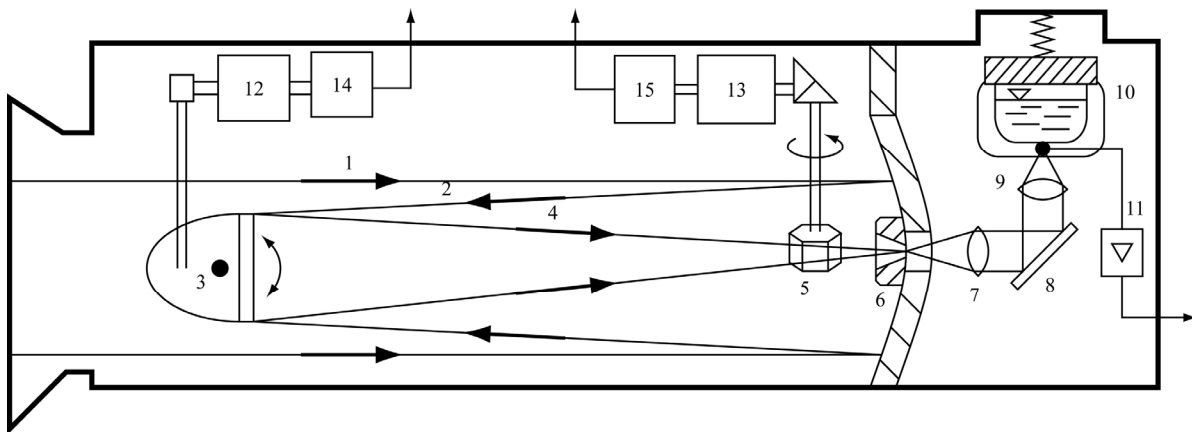
### c) Termovize

představuje současnou moderní a efektivní celoplošnou bezdotykovou metodu pro měření teplotních polí na povrchu těles. Umožňuje přímé sledování jejich časových změn (tím se výrazně odlišuje od fototermometrie) a možností filmovat je, zaznamenávat na magnetofon, na videokazety. Obrázec teplotních polí je označován jako **termogram**, na němž různým intenzitám záření, z nichž lze přepočtem stanovit teploty, odpovídají různé stupně šedi, nebo různé barevné odstíny. Teplotní pole se snímá speciálním teplotním čidlem – detektorem infračerveného záření. V současnosti existují tyto dva typy detektorů:

- **kvantový detektor** – je to selektivní detektor, který při dopadu infračerveného záření zvyšuje svoji elektrickou vodivost. Za provozu musí být chlazen kapalným dusíkem.
- **pyroelektrický detektor** – je to neselektivní detektor, který při dopadu infračerveného záření zvyšuje svoji teplotu a vznikne v něm elektrický náboj. Není ho třeba chladit.

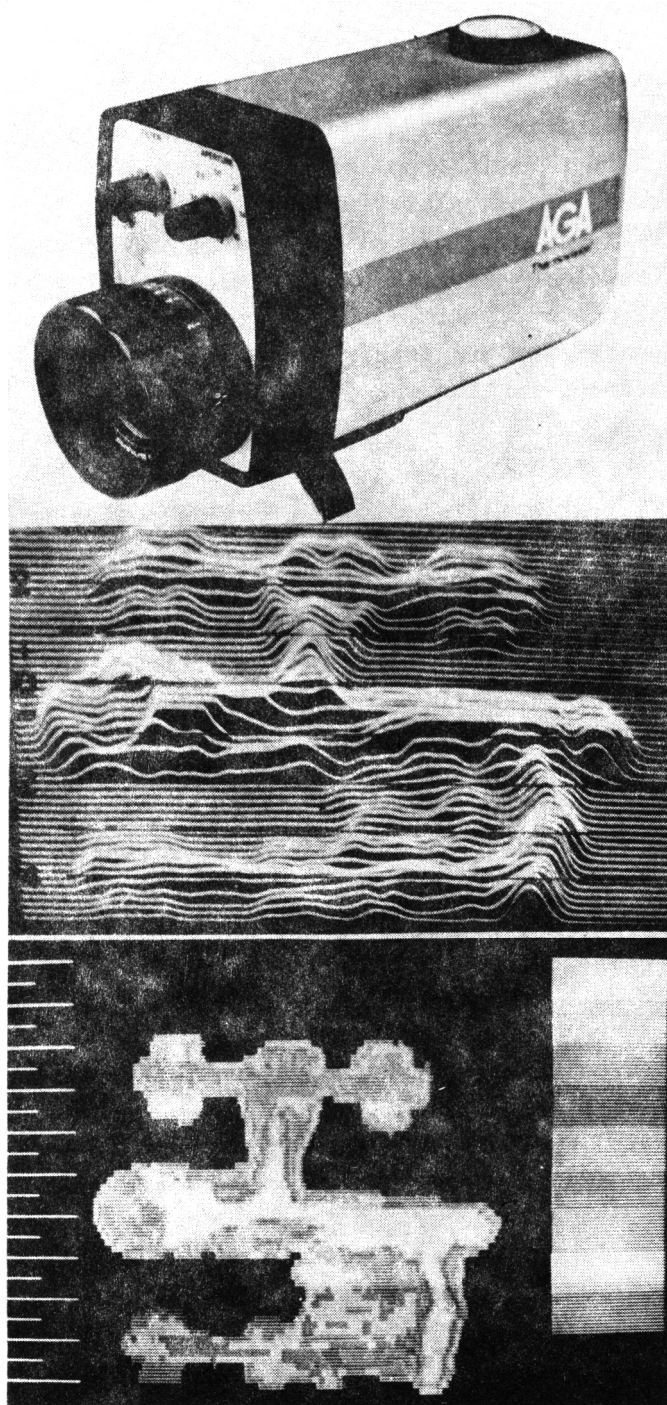
Snímací systémy jsou dvojího druhu, a to s postupným rozkladem obrazu a televizním přenosem a systémy přímo zobrazující.

Dnes je nejrozšířenější první druh snímacích systémů s **opticko-mechanickým rozkladem obrazu**. Snímací kamera tohoto systému je schematicky znázorněna na obr. 12.22. Svazek paprsků 1 zachycených kamerou je dutým zrcadlem 2 soustředěn na ploché zrcadlo 3. Toto kmitá kolem vodorovné osy frekvencí 16 Hz a vertikálně rozkládá obraz. Paprsky 4 odražené záření procházejí křemenným osmibokým hranolem 5, který se otáčí kolem svislé osy rychlostí 200 otáček za sekundu a rozkmitává paprsky podél řádku. Po průchodu clonou 6 s germaniovou čočkou 7 se odrazí od zrcadla 8 na kvantový detektor 9 z antimonidu india, který je zabudován na dně Dewarovy nádoby 10 naplněné tekutým dusíkem. Detektor transformuje dopadající tepelné záření na elektrické signály, které po zesílení v zesilovači 11 vedou do zobrazovací jednotky. Zrcadlo 3 a rotující hranol 5 jsou poháněny motorčky 12 a 13 a regulovány fotoelektrickými vysílači 14 a 15. Zobrazovací jednotky zajišťují vytvoření termogramu na obrazovce oscilografu. Fotografování na barevné filmy lze získat snímek v barvách odpovídajících příslušným izotermám. Termogram lze filmovat frekvencí 8 obrázků za sekundu. Po zpracování termogramu na počítači je vhodné provést záznam signálu.



obr. 12.22

Termovizně lze měřit v intervalu 30°C do 1200°C a rozlišitelnost 0,2°C. Komerční provedení animací termovizní kamery AGA je na obr. 12.23a. Ukázka termogramu odlitku v určitém časovém okamžiku po odlití je na obr. 12.23b. Prostorové znázornění teplotního pole je na obr. 12.23c.



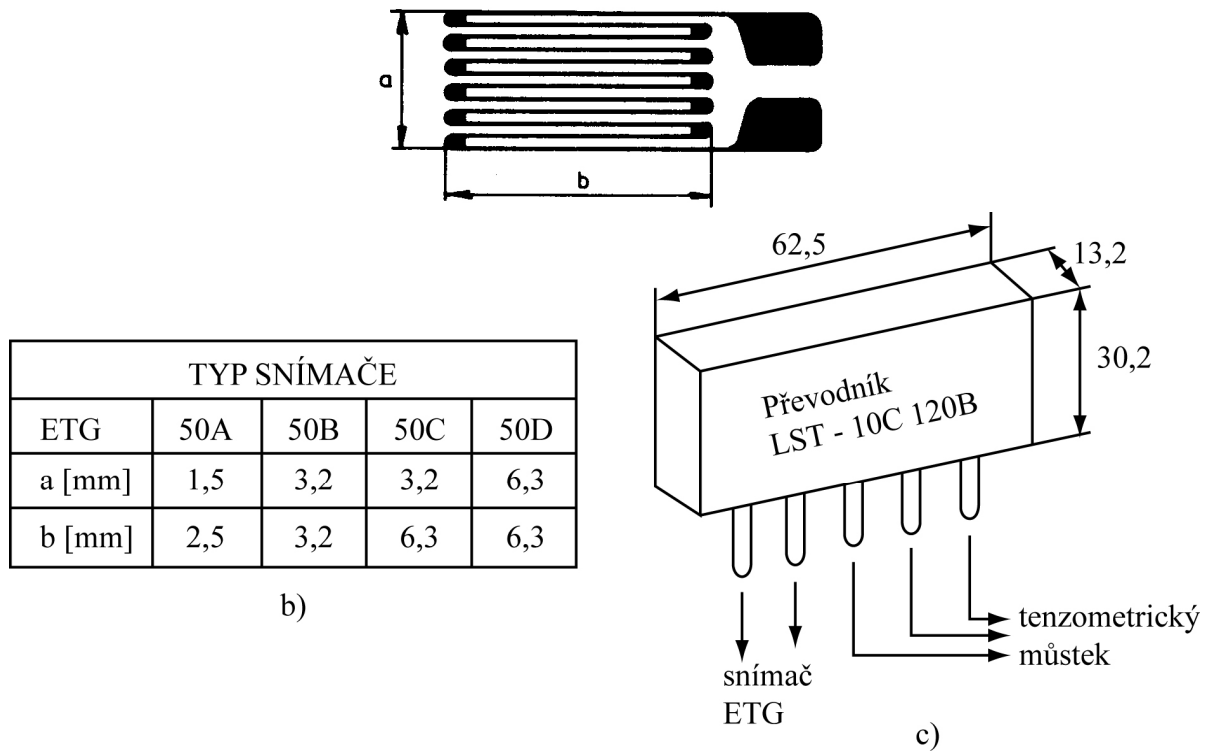
obr. 12.23

### 12.5.5 Odporové foliové snímače teploty

Tyto snímače se vyrábějí stejnou technologií jako odporové foliové tenzometry a mají i obdobnou geometrickou konfiguraci, obr. 12.24a. Jako typické představitele foliových snímačů uvádíme výrobky firmy Vishay Micro-Measurements. Komerčně dodává dva typy snímačů: snímače TG (-200 až +200 °C) a CLTS (-270°C až 24°C),

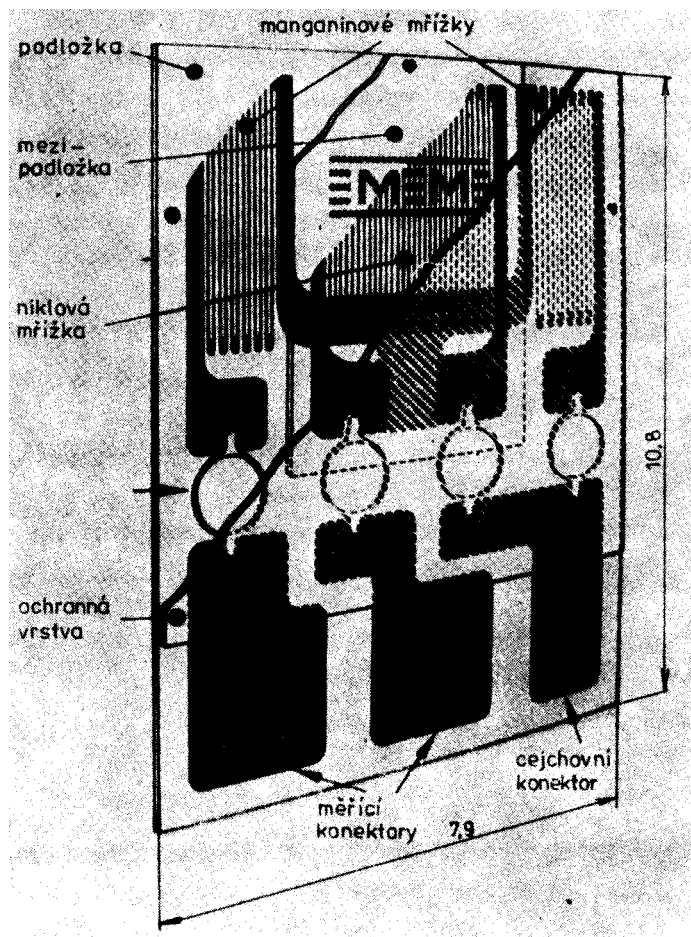
Snímače TG mají geometrii dle obr. 12.24 a rozměry dle tabulky. Měřicí mřížka je z vysoce čistého niklu a má tloušťku 5  $\mu\text{m}$ . Na povrch předmětu se lepí rychleschnoucím lepidlem. Změnu odporu v závislosti na změně teploty lze měřit tenzometrickým odporovým můstkem. Mezi tento můstek a teplotní snímač je zapojen převodník (obr. 12.24c), který zajišťuje linearitu závislosti „odpor – teplota“. Vyrábí se v provedeních zajišťujících

citlivost  $10 (\mu\text{m/m})/^{\circ}\text{C}$  resp.  $100 (\mu\text{m/m})/^{\circ}\text{C}$ , pro můstkové odpory  $120 \Omega$ , resp.  $350 \Omega$ . Linearizace a přizpůsobení citlivosti platí pro K-faktor 2,00 nastavený na tenzometrickém můstku.



obr. 12.24

Pro oblast extrémně nízkých teplot vyrábí firma Vishay snímače CLTS, jejichž geometrická konfigurace, rozměry a materiály mřížek jsou zřejmé z obr. 12.25. Výrobce udává přesnost měření teploty  $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  při použití běžných tenzometrických můstků.



obr. 12.25

## 12.6 Měření vlhkosti vzduchu

### 12.6.1 Úvod

V mechanice těles nás zajímá především měření vlhkosti atmosférického vzduchu. Na její hodnotě závisí spolehlivost provozu měřících přístrojů a přímo ovlivňuje výsledky měření některých měřících metod (křehké laky, tenzometrie). Veličin, které určují vlhkost vzduchu, je celá řada. Patří mezi ně:

**absolutní vlhkost vzduchu**  $\phi$  – určená hmotností vodních par v jednotce objemu, tedy měrnou hmotností par  $\rho_p$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ]. Při určité teplotě může ve vzduchu existovat jenom určité množství vodních par. Je to tzv. **stav nasycení** (mez sytosti), který nastane, dosáhne-li parciální tlak vodní páry příslušné meze sytosti při dané teplotě (veličiny odpovídající tomuto stavu se běžně označují dvěma čárkami nad symbolem veličiny), tedy  $\phi'' = \rho_p''$ , kde  $\rho_p''$  je měrná hmotnost vodní páry na mezi sytosti.

**relativní vlhkost vzduchu**  $\varphi$  charakterizuje vlhkost vzduchu v případech, kdy  $\phi < \phi''$ . Udává, do jaké míry je vzduch při dané teplotě a tlaku nasycen vodními parami. Lze ji definovat, jako poměr skutečné absolutní vlhkosti  $\phi$  a maximální hodnoty  $\phi''$ , jaká by za dané teploty a tlaku vzduchu odpovídala stavu nasycení. Je tedy:

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi''} = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{p_p}{p_p''} \quad [-] \text{ resp. } \varphi = \frac{\phi}{\phi''} 100 \quad [\%]$$

kde  $p_p$  je parciální tlak vodních par ve vzduchu,

$p_p''$  je tentýž tlak na mezi sytosti.

**teplota rosného bodu**  $t_r$  [°C] – je to teplota, při níž jsou vodní páry ve vzduchu při izobarickém ochlazení právě syté. Na povrchu zrcátka, které má přibližně teplotu  $t_r$ , nastane kondenzace par.

V technické praxi se pro popis vlhkosti vzduchu nejčastěji používá relativní vlhkost, která se určuje tzv. **psychrometrickou metodou** a teplota rosného bodu, která se určuje **kondenzační metodou**. Tyto metody v dalším stručně rozebereme.

### 12.6.2 Psychrometrická metoda pro měření relativní vlhkosti

Měřicím přístrojem u této metody je tzv. **psychrometr**, jehož důležitými prvky jsou dva měřicí **teploměry**, **suchý** a **mokký**, obr. 12.26a. Mokký teploměr je stále ovlhčován vodou, která vzlíná tkaninou do níž je zavinuta nádobka teploměru. Suchý teploměr měří teplotu vzduchu  $t_s$ . Odpařováním vody z tkaniny se nádobce odebírá výparné teplo a její teplota klesá na nejnižší teplotu  $t_m$  dosažitelnou za daného stavu vzduchu odpařováním vody. Teplotní rozdíl ( $t_s - t_m$ ) tzn. **psychrometrický rozdíl** je mj. závislý i na rozdílu parciálních tlaků ( $p_{pm}'' - p_s''$ ) vodní páry odpovídajících teplotám  $t_s$  a  $t_m$ , musí tedy existovat i relace mezi rozdílem ( $t_s - t_m$ ) a relativní vlhkostí vzduchu  $\varphi$ . Tento vztah se obvykle uvádí ve tvaru

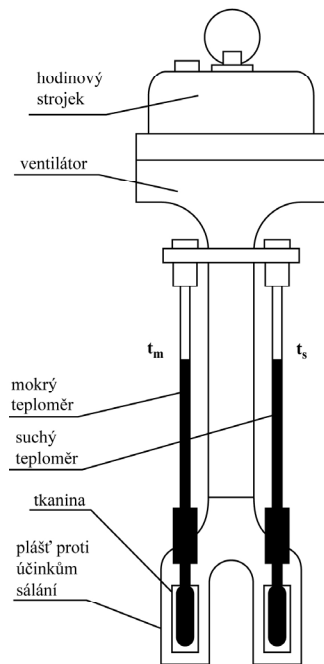
$$\varphi = \frac{p_{pm}'' - A(t_s - t_m)p_b}{p_{ps}''}$$

kde  $p_{pm}'' > p_{ps}''$  jsou parciální tlaky vodní páry na mezi sytosti při teplotě  $t_m$ , resp.  $t_s$

$p_b$  je barometrický tlak,

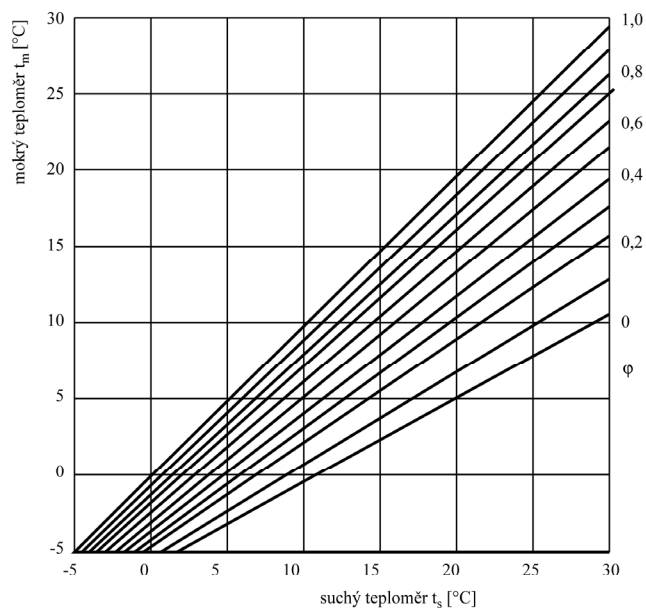
$A$  [K<sup>-1</sup>] je psychrometrická konstanta.

Schéma psychrometru



a)

Nomogram pro stanovení relativní vlhkosti



b)

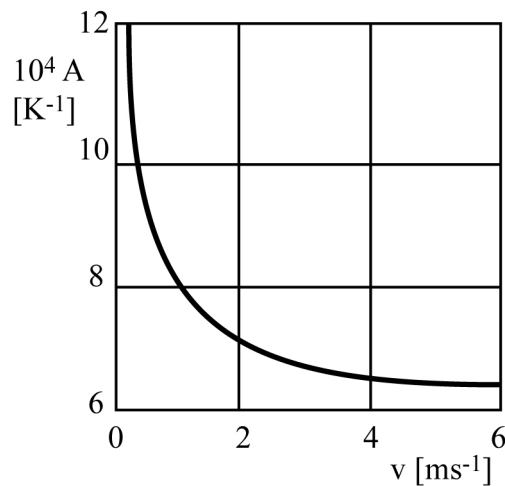
obr. 12.26



Psychrometrickou konstantou se koriguje rozdíl mezi skutečným a teoretickým adiabatickým průběhem sušení u vlhkého teploměru. Její hodnota je závislá především na rychlosti proudění vzduchu kolem nádoby mokrého teploměru (obr. 12.27).

Z této závislosti vyplývá, že pro přesné měření vlhkosti je nutné používat psychrometry s nuceným prouděním vzduchu (při  $v > 2 \text{ ms}^{-1}$  je A málo proměnné). Toto zajišťuje ventilátor poháněný např. hodinovým strojkem. Otáčky ventilátoru bývají voleny tak, aby rychlost proudu vzduchu kolem nádoby byla cca  $2 \text{ ms}^{-1}$ . Relativní vlhkost lze stanovit z nomogramu (obr. 12.26b). U nás jsou v současnosti k dispozici psychrometry TZ9 s těmito parametry: měřicí rozsah  $\varphi$  (10 až 100%), přesnost 1%, dělení teploměrů po  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Poznámka:** Další metodou pro určování relativní vlhkosti je metoda hygrometrická, založená na schopnosti některých látek udržovat svoji vlhkost v rovnovážném stavu s vlhkostí vzduchu. K měření se používá vlasový nebo blánový hygrometr, resp. hygrometrická sonda, používající k dosažení rovnovážného stavu vnějšího ohřevu hygroskopické látky (např. chloridu litného).



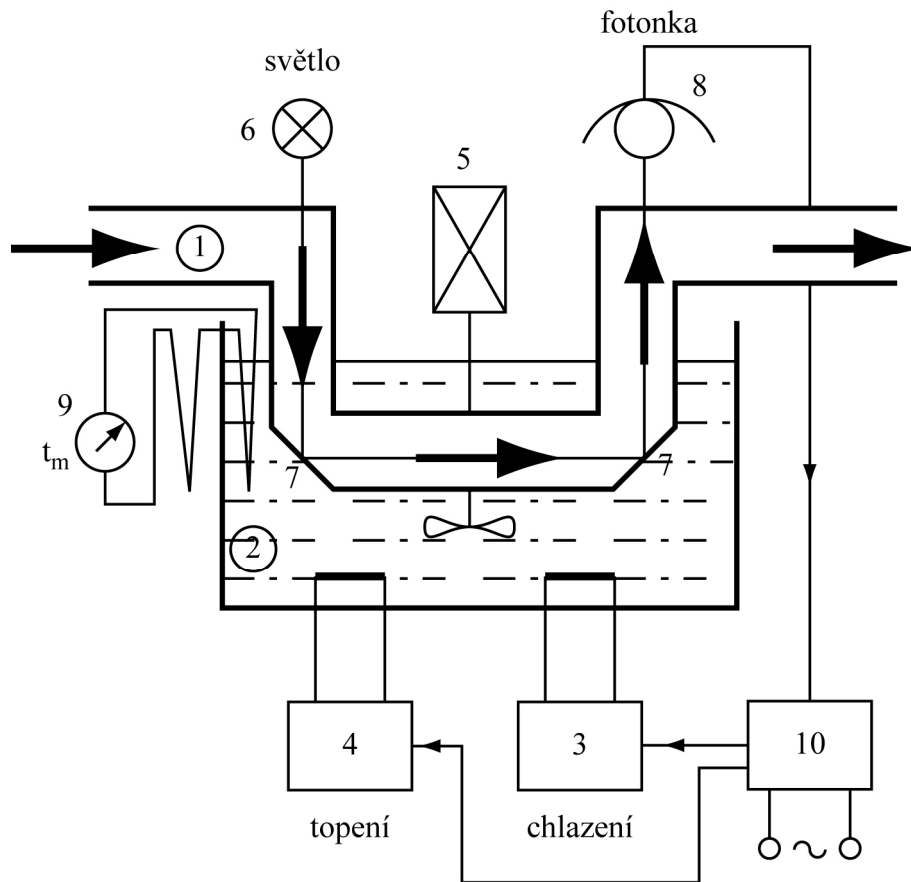
obr. 12.27

### 12.6.3 Kondenzační metoda pro měření teploty rosného bodu

Podstata metody spočívá v určování teploty rosného bodu  $t_r$ , tedy teploty, při níž je vzduch nasycen vodními parami. Prakticky se realizuje tak, že se lesklá kovová plocha ochlazuje na teplotu, při níž se na ploše začne srážet pára z ovzduší v podobě jemné rosy. Schéma přístroje pro určování teploty  $t_r$  je na obr. 12.28. Vzduch, jehož teplotu  $t_r$  určujeme, prochází potrubím 1, které je ponořeno do lázně termostatu 2. Do lázně jsou umístěny tělesa chladiče 3 a topení 4, které spolu s míchadlem 5 zajišťuje rovnoměrné ochlazování a ohřívání lázně. Součástí zařízení je světelný zdroj 6, soustava zrcadel 7 a fotonka 8. Teplotu lázně měří odporový teploměr nebo termočlánek 9.

Princip měření je tento: světlo ze zdroje 6 prochází soustavou zrcadel do fotonky. V okamžiku, kdy teplota lázně v termostatu dosáhne teploty, která je rovna teplotě rosného bodu  $t_r$ , zrcadla se orosí a přestanou odrážet světlo. V tomto okamžiku zapne fotonka prostřednictvím regulátoru 10 topení a vypne chlazení. Topení je zapnuto tak dlouho, až zmizí orosení. Pak se zase zapne chlazení a celý cyklus se opakuje. Teplota lázně a tím i začátek tedy kolísá kolem teploty rosného bodu a lze ji při použití elektrických teploměrů upravit na signál pro dálkový převod.

### Schéma kontinuálně měřícího hygrometru



obr. 12.28

#### Poznámka na závěr.

V předcházejících odstavcích jsme se zabývali měřícími metodami pro experimentální vyšetřování veličin souvisejících s oborem mechaniky těles. Je to jen část veličin, které se experimentálně vyšetřují v rámci technických měření ve strojírenství. V rozsahu těchto skript není možné provést rozbor měřících metod všech veličin měřených ve strojírenských oborech. K tomu existují ucelené monografie, speciálně zaměřené na experimentální určování jednotlivých veličin a na měřící metody, např. měření tlaků, teplot, výkonu, tenzometrická měření, fotoelasticimetrie apod. Zde jen uvedme, že v těchto skriptech jsme se nezabývali pro strojaře tak důležitými problematikami, jako je měření objemového a hmotnostního průtoku, rychlosti proudění kapalin a plynů, měření výšky hladiny, měření odběru množství tepla, měření mechanického a elektrického výkonu, měření hluku, fotometrie, měření rozměru, délek a času, měření radiace, exhalací apod. Uvedený výčet nepřebraných problémů necht' je pobídkou k samostudiu pro získání profesionality absolventů.